

**OPTIMIZACIÓN DEL COSTO DE UNA VIVIENDA VIS, MEDIANTE UN  
ALGORITMO DE EVOLUCION DIFERENCIAL**

**MIGUEL ALEXANDER MOTTA ROJAS**

**CODIGO: 502597**

**CRISTIAN FERNEY MORENO GARZON**

**CODIGO: 502804**



**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
TRABAJO DE INVESTIGACION  
BOGOTA  
2021**

**OPTIMIZACIÓN DEL COSTO DE UNA VIVIENDA VIS, MEDIANTE UN  
ALGORITMO DE EVOLUCION DIFERENCIAL**

**MIGUEL ALEXANDER MOTTA ROJAS**

**CODIGO: 502597**

**CRISTIAN FERNEY MORENO GARZON**

**CODIGO: 502804**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de  
Ingeniero Civil**

**Director:**

**OSCAR CONTREARAS BEJARANO**

**Ing. Civil Msc.**



**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL  
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ  
2021**



## Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es). [Advertencia.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es)

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

**Adaptar** — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es).

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es).

Fuente. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

PRESIDENTE DEL JURADO

---

JURADO

---

JURADO

Bogotá, junio, 2021.

## **RESUMEN**

Esta investigación pretende aplicar un proceso de optimización de costo a través del conocimiento de las secciones transversales de los elementos en concreto con las cuales se diseñó inicialmente un prototipo de vivienda de interés social, diseñado en combinaciones con guadua y concreto.

Para el desarrollo se utilizó el Algoritmo de Evolución Diferencial, el cual es una técnica de optimización que se ha utilizado en el campo de la ingeniería civil para la minimización de variables. Este algoritmo, al estar basado en la evolución de Darwin, logra ser capaz de desarrollar procesos de búsqueda iterativa hasta encontrar una solución óptima para problema analizado.

Como resultado se demostrará que el costo de la estructura podrá ser reducido una vez el algoritmo de evolución diferencial optimice la sección transversal de los elementos de concreto que conforman la estructura diseñada; es decir, el precio total puede ser menor, gracias a la aplicación de la técnica de optimización utilizada y respetando siempre los parámetros establecidos por la normatividad colombiana vigente.

## DEDICATORÍA

A mi familia  
Especialmente a mi madre  
A mi esposa y a mi hijo Joaquín.

*Miguel Motta.*

A mi madre  
A mi esposa  
En memoria de mis abuelos y mi padre Guillermo

*Cristian Moreno.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre Ligia Garzón porque ha sido mi apoyo incondicional y la que me ha acompañado a lo largo de este proceso de aprendizaje, no solo académico sino profesional, a ella, que ha sido mi mayor motor para acoger y sobrellevar las adversidades de la vida de la mejor manera.

A mi familia, mi padre, mi hermana, mi esposa, mi hijo y en especial a mi madre Marisol Rojas quien me ha apoyado y me ha orientado a lo largo de esta etapa de mi vida, para que sea no solo un buen profesional si no buena persona en todos los aspectos y situaciones que se presenten en mi vida.

Un agradecimiento especial a todos los docentes de la Universidad Católica de Colombia, que siempre estuvieron presentes para orientarnos y transmitir su conocimiento y experiencia con el paso de los días durante desarrollo del trabajo, gracias por su paciencia, tiempo dedicado y conocimiento transmitido, al Ingeniero Oscar Bejarano por su orientación y acompañamiento en el desarrollo de este trabajo, por su compromiso y profesionalismo para transmitir sus conocimientos.



## CONTENIDO

RESUMEN .....	5
AGRADECIMIENTOS .....	8
CONTENIDO .....	9
INDICE DE TABLAS .....	11
LISTA DE FIGURAS .....	12
INTRODUCCIÓN .....	13
1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....	14
1.1 ANTECEDENTES .....	14
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	17
2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	19
3. MARCO DE REFERENCIA .....	20
3.1 MARCO TEÓRICO .....	20
3.1.1. PROCESO DE MUTACIÓN. ....	21
3.1.2. PROCESO DE COMBINACIÓN .....	22
3.1.3. PSEUDO ALGORITMO DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL .....	23
3.1.4. ANÁLISIS MATRICIAL PÓRTICOS EN 3D .....	24
3.2 MARCO CONCEPTUAL .....	27
4. ESTADO DEL ARTE .....	29
5. OBJETIVOS .....	33
5.1 OBJETIVO GENERAL .....	33
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	33
6. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	34
6.1 ALCANCES .....	34
6.2 LIMITACIONES .....	34
7. METODOLOGÍA .....	35
8. DESCRIPCIÓN DEL MODELO .....	36

8.1	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	36
8.2	CARACTERÍSTICAS MECANICAS.....	38
8.3	RESTRICCIONES .....	38
9.	ALGORITMOS ACOPLADOS.....	39
9.1	DATOS INICIALES .....	39
9.2	ANÁLISIS DE CARGAS.....	41
9.2.1	CARGA MUERTA (D) .....	41
9.2.2	CARGA VIVA (L) .....	42
9.2.3	CARGAS DE VIENTO (W) .....	42
9.2.4	CARGA SISMICA (E) .....	42
9.2.5	DEA.....	44
10.	RESULTADOS.....	48
10.1	DISEÑO DE COLUMNAS.....	48
10.2	ANÁLISIS DE COSTOS .....	50
11.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	58
12.	BIBLIOGRAFIA .....	60
13.	ANEXOS .....	62

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas y geométricas de los elementos.....	38
Tabla 2. Asignación de Carga muerta.....	41
Tabla 3. Análisis sísmico F.H.E. ....	43
Tabla 4. resumen de cargas aplicadas. ....	44
Tabla 5. Análisis de Precios Unitarios Propuesta Inicial. ....	52
Tabla 6. Análisis de Precios Unitarios Propuesta Optimizada. ....	53
Tabla 7. Comparativo concreto.....	56
Tabla 8. Precio total del concreto.....	57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico comparativo valores guadua vs otros materiales constructivos..	15
Figura 2. Pabellón de bambú .....	17
Figura 3. Grados de libertad pórticos 3D .....	24
Figura 4. Fuerzas aplicadas pórticos 3D.....	25
Figura 5. Constante de torsión pórticos 3D 2.....	25
Figura 6. Matriz de rigidez coordenadas locales para pórticos 3D.....	26
Figura 7. Asignación de matrices de rotación para x, y, z.....	27
Figura 8. Matriz de Transformación. ....	27
Figura 9. Figura tridimensional modelo vivienda (Matlab).....	36
Figura 10. Planta General vivienda.....	37
Figura 11. Derivas máximas expresadas como porcentajes de hpi .....	38
Figura 12. Numeración de nodos y elementos Ejes A y B respectivamente .....	39
Figura 13. Numeración de nodos y elementos Ejes C y D.....	39
Figura 14. Numeración de nodos y elementos Ejes E y 1 .....	40
Figura 15. Numeración de nodos y elementos Ejes 2,3 y 4 .....	40
Figura 16. Espectro elástico de diseño. ....	42
Figura 17. Matriz de rigidez Matlab.....	46
Figura 18. Continuación Matriz de rigidez Matlab .....	46
Figura 19. Vista planta prototipo vivienda, desplazamientos .....	48
Figura 20. Desplazamientos obtenidos, modelo tridimensional .....	49
Figura 21. Número de restricciones no satisfechas. ....	49
Figura 22. Índice de Costos de la Construcción de Vivienda – ICCV. ....	50
Figura 23. Comportamiento de la variación anual del ICCV total y VIS según Grupos de Costos.....	51
Figura 24. Planta prototipo secciones modificada.....	55
Figura 25. Corte prototipo secciones modificada .....	56

## INTRODUCCIÓN

La construcción de vivienda en el país ha incrementado de manera paulatina, debido en parte a la gran variedad de subsidios y alivios que el gobierno nacional entrega a todas las personas que están interesadas en la adquisición de vivienda propia, como consecuencia de esto han surgido diferentes propuestas en cuanto a materiales, procesos constructivos y diseños, los cuales deben ser adaptados de manera progresiva, buscando mejorar diferentes necesidades que se presentan a nivel constructivo y que permitan realizar mejoras, buscando estructuras sostenibles, y que durante su construcción logren minimizar el impacto al medio ambiente; El desarrollo de nuevas tecnologías dentro de la construcción de obras civiles ha repuntado optimizando los procesos constructivos, de tal manera, que se pueden construir columnas de manera convencional con una sección relativamente más esbelta que la de muchas construcciones antiguas.

En el país se ha construido tradicionalmente con elementos convencionales como el concreto y el acero, dejando un poco de lado el hecho de que Colombia cuenta con diferentes especies de guadua, las cuales son usadas comúnmente en el eje cafetero, explotando de esa manera el potencial en materia de construcción de este material. Considerada como una hierba gigante, en general la guadua posee buenas propiedades físico - mecánicas, de durabilidad, de resistencia y economía; de tal forma, además de esto, la producción de la *Angustifolia Kunt*, es rápida y su adquisición en esa zona del país es económica, presentándose también como una alternativa llamativa ante la demanda de especies maderables en el campo de la construcción.

En ese sentido, con la presente investigación se pretende reducir los costos de construcción del proyecto de una casa que será construida de manera combinada entre guadua y materiales convencionales logrando reducir la sección de las columnas, optimizando de esta manera tanto el peso como el costo de este tipo de proyectos; estos estudios están sujetos a las restricciones asociadas a desplazamientos, con lo que se garantiza que el resultado debe cumplir con las condiciones normativas.

## **1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES**

El potencial de la guadua como elemento de construcción tiene su apogeo en las zonas tropicales, siendo una alternativa de construcción resistente y económica, la cual tiene un impacto menor que las materias primas usadas comúnmente en la construcción. Esta alternativa en Colombia se ha explorado en apenas una parte del territorio, hace más de 25 años, en proyectos que actualmente demuestran la capacidad que la guadua puede de ser un material estructuralmente más reciente que otras maderas, e incluso más durable en ocasiones que el concreto.

Todo esto, sumado a las políticas ambientales implementadas para la construcción, ha llevado a que la guadua sea utilizada comúnmente como refuerzo, siendo este un componente para fusionarse casi naturalmente, formando altas relaciones resistencia - peso, obteniendo como resultado estructuras más resistentes y livianas sin dejar de lado esbeltez y la belleza de esta [1].

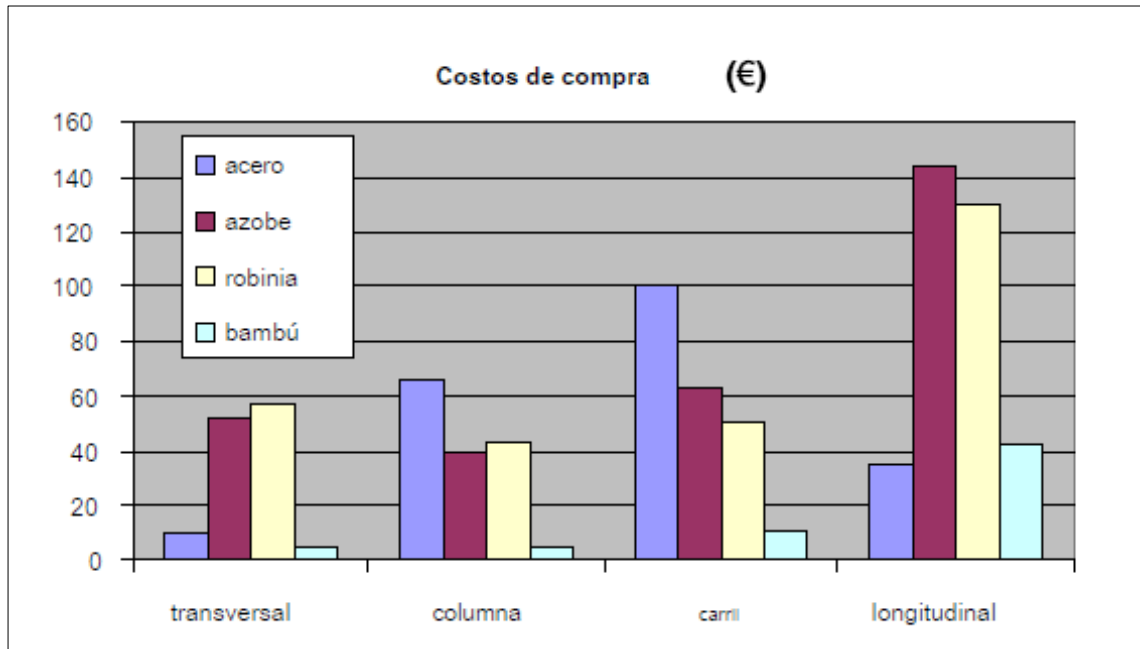
En abril del año 2000, en la feria mundial Expo-Hannover, en Alemania, se construyó el pabellón de Zeri, el cual está constituido principalmente por guadua, combinada con otros tipos de maderas como el aliso, el chusque, el arboloco y el sapan; esta construcción permitió que a la guadua se le denominara y conociera como el acero vegetal" [2].

A través de un análisis realizado por diferentes entidades como la Universidad de Wageningen en los Países Bajos, se demuestra como el armazón de bambú laminado puede ser una gran alternativa para la construcción de una casa tipo en Colombia, aprovechando el potencial que tiene el país como productor de guadua ya que el área efectiva de cultivo es de aproximadamente 27.797 hectáreas con un área de estudio para posible siembra de 1'029.524 hectáreas, brindando los recursos necesarios para construir una casa multifamiliar de 175m<sup>2</sup> [3].

En los países de Suramérica como Brasil es comúnmente utilizada la guadua, ya que desde la década del 70 se han realizado estudios dedicados al desarrollo de metodologías para la implementación de la guadua en la construcción como refuerzo en estructuras especiales en concreto [4].

En el año 2005 se realizaron estudios para verificar el potencial de la guadua en procesos constructivos en Europa occidental en donde se evidencio que aparte de ser un material sostenible es económico respecto a los materiales de construcción convencionales como el acero, el concreto y la madera, demostrando su capacidad de competir en el campo de la construcción [5].

Figura 1. Gráfico comparativo valores guadua vs otros materiales constructivos



Fuente: Adaptado de (P. Van Lugt, 2006)

En la Tesis "La Guadua Un sistema Innovador para la Construcción de Vivienda en Anapoima Cundinamarca" por German Forero y Hermann Souza de la Universidad de la Salle en el año 2008, se analiza la incursión que ha tenido este material en la construcción de viviendas en materiales económicos como la guadua, especialmente en comunidades de bajos recursos, en países como Costa Rica, Ecuador y Colombia, se busca con esto establecer prototipos de viviendas resistentes, sostenibles y viables económicamente para las comunidades más vulnerables del país [6].

Uno de los estudios realizados en el año 2015 por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), sobre "La guadua una alternativa para la construcción de viviendas de interés social" indicaba como resultado, que la guadua se podría considerar como una de las mejores soluciones para la problemática del déficit

habitacional, adicionalmente mostraban las excelentes propiedades con valores de resistencia a la tracción de 430MPa, resistencia a la flexión de 740MPa, módulo de elasticidad a tracción de 190000 kg/m<sup>2</sup>, módulo de elasticidad a la compresión de 184000 kg/m<sup>2</sup> y módulo de elasticidad a flexión de 179000 kg/m<sup>2</sup>, estas cifras demuestran que la guadua puede contribuir como material constructivo y demostrando que puede cumplir los estándares que exige la normativa colombiana, en resistencia y sostenibilidad [7].

De acuerdo con la información recopilada a través de todos estos estudios en la tesis "Diseño Arquitectónico y Estructural De Una Vivienda De Interés Social Rural En Guadua (Angustifolia Kunth)" de 2015, se observa que los autores combinaron aspectos como técnicas de diseño, materiales convencionales y la guadua como complementos en un sistema funcional, en el cual, se da prioridad al cumplimiento de estándares mínimos de habitabilidad, economía y calidad, realizando un esquema básico, con un sistema constructivo aporticado el cual se desempeña estructuralmente de manera adecuada a la normativa vigente para Colombia (Norma Sismo-resistente 2010 NSR-10); Este tipo de diseños se puede mejorar u optimizar con técnicas relativamente "nuevas" en el sector de la Construcción [8].

Estas mejoras u optimizaciones se tratan en principio de hacer de manera tal que se mejoren aspectos como forma y economía, sin dejar de lado el cumplimiento de normas y estándares, motivo por el cual se implementaron los algoritmos en la depuración de este tipo de características presentes al momento de generar un diseño.

Los algoritmos (de evolución diferencial), emulan la teoría de evolución de las especies puesto que parten de varias soluciones posibles a un problema para llegar a la solución más adecuada que sería la que sobreviva; A partir de una población inicial, se evalúan las bondades que cada condición o solución que ofrece, siendo en este caso un valor que se itera buscando la mejor combinación de estas características y deteniéndose en caso de ser la mejor solución al problema, siendo en resumen, una herramienta de búsqueda que se basa en el funcionamiento de la estructura para evaluar y predecir la mejor solución a un problema adaptándose a las restricciones que le sean presentadas [9].



## 1.2 JUSTIFICACIÓN

En Colombia la construcción de vivienda de interés social VIS crece paulatinamente, por este motivo surge la necesidad de revisar de manera detallada los diseños y análisis de este tipo de proyectos, de tal manera que se garantice la construcción de estructuras eficientes en aspectos relacionados con el peso de la estructura, economía y eficacia.

Figura 2. Pabellón de bambú



Fuente: Adaptado de (Mata , 2021)

Por ejemplo, en Suiza, estudiantes de arquitectura de la universidad ETH Zúrich diseñaron y crearon un pabellón de bambú. La estructura tiene un peso de 200 kilogramos a pesar de cubrir más de 40 metros cuadrados [10].

En Colombia se exploró este material directamente en la construcción de vivienda en un proyecto desarrollado en Girardot por el Arquitecto Simón Vélez en el año de 2003; tuvo un gran reconocimiento tanto a nivel nacional como internacional por la aplicación de la guadua en este tipo de edificaciones. Con los “barrios de guadua”, como son llamados se pretende ofrecer una mejor calidad garantizando una construcción que no afectara de manera considerable el medio ambiente, sin dejar

a un lado el beneficio en los costos económicos que este tipo de viviendas generar una familia colombiana.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, en el presente trabajo se pretende realizar la optimización de los costos del prototipo de vivienda a través del cálculo de la opción más viable de la sección transversal de sus columnas con el fin de tener una alternativa que reduzca el peso de la estructura y minimice costos de construcción. Con esta optimización se propone un diseño de vivienda rural que cumpla con los requerimientos de sismo resistencia exigidos por la normatividad colombiana. La importancia de esta investigación radica en la minimización del costo de la estructura.

Con este tipo de trabajo se pretende además potencializar el uso de las técnicas de optimización en la revisión de diseños alternativos, con el fin de hacerlos más eficientes en una técnica poco explorada que tiene una efectividad alta en el momento de buscar entre muchas opciones la mejor en cuanto a las características iniciales presentadas, así como seguir motivando a constructores y a ejecutar este tipo de proyectos que son económicos y de fácil realización.

## **2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Actualmente en la construcción se están implementando materiales diferentes a los convencionales (Concreto- Mampuesto), con los cuales se pretende edificar de manera amigable con el ambiente teniendo en cuenta que la producción de dichos materiales genera una menor cantidad de emisiones y residuos durante el proceso de construcción.

Dichas estructuras como la que será objeto de estudio en el presente documento son diseñadas con el objetivo cumplir con la normatividad en el caso de durabilidad, resistencia a las fuerzas y que se sostenga así misma, por tanto, se plantean de forma casi similar a otros diseños que tienen tradición en el mercado y no se cambia el concepto convencional, que nos lleva el diseño a mejorar, en muchos casos el peso y el costo de la estructura, debido en parte a que la construcción de estas viviendas se encuentra orientadas a satisfacer necesidades básicas. El análisis de estas variables presentes en estas estructuras permitirá proponer un mejor diseño en cuanto a forma y costo. Es por esto por lo que se plantea la siguiente pregunta:

¿Cuál es el menor costo de las columnas en concreto de la vivienda VIS optimizando la sección transversal de las mismas, a través de la aplicación de un algoritmo de evolución diferencial que permita definir las más esbeltas sin dejar de lado el cumplimiento de las derivas?

Por lo anterior y pretendiendo explicar la manera en la cual se quiere modificar la sección transversal de esta estructura, se plantea realizar la optimización del diseño de una vivienda VIS en guadua propuesto en la tesis de grado por los estudiantes de la Universidad Católica de Colombia Nidia Constanza Nieto y Antonio Trujillo, mediante el uso del Algoritmo de Evolución Diferencial.

### 3. MARCO DE REFERENCIA

#### 3.1 MARCO TEÓRICO

Son procesos en los cuales se realizan combinaciones de una determinada población de individuos o soluciones, que en una iteración determinada debe aproximarse a una solución óptima o llegar a la mejor solución de un problema en específico; DEA se basa en la teoría de evolución de Darwin acerca de la evolución de las especies ya que los individuos cambian o evolucionan al realizar cruces o mutaciones para mejorar su desempeño en función de características específicas [11]. En esta teoría se debe tener en cuenta el proceso de selección de las especies más fuertes, estas son las únicas que continuaran con procesos de mutación y combinaciones.

Como se había indicado anteriormente, este algoritmo parte de la generación de una población inicial. La población inicial se escoge de manera aleatoria del grupo de poblaciones que se tenga.

Para su representación en forma matricial la población inicial se designa como  $X$  y los subíndices representan las filas y columnas de posicionamiento vectorial del valor que toma cada individuo en la población, tal como se indica a continuación:

$$x_{ij} = \begin{Bmatrix} x_{i,j} & x_{i+1,j} & x_{i+2,j} & \dots & x_{n,j} \\ x_{i,j+1} & x_{i+1,j+1} & x_{i+2,j+1} & \dots & x_{n,j+1} \\ x_{i,j+2} & x_{i+1,j+2} & x_{i+2,j+2} & \dots & x_{n,j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{i,N} & x_{i+1,N} & x_{i+2,N} & \dots & x_{n,N} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

$n$  = Número de individuos

$N$  = Número de poblaciones

Posteriormente el algoritmo analiza cuál es la población más viable o con mejores resultados en cada iteración, este proceso también comprueba que estos valores generados se encuentran dentro del rango preestablecido, tanto como su valor mínimo como máximo el cual se valida con la siguiente expresión:

$$Si X_{ij} > Vmax \rightarrow X_{ij} = Vmax \quad (2)$$

$$Si X_{ij} < Vmin \rightarrow X_{ij} = Vmin \quad (3)$$

Cuando estos valores sobrepasan el  $V_{max}$  (valor máximo) se reemplaza por el valor máximo que se condiciona en el proceso, de igual forma para los valores que están por debajo del valor mínimo.

Ya con estos nuevos valores calculados se procede a determinar los valores de forma, el cual es la solución de la función objetivo con los resultados de la variable que fue iterada, cuando se está analizando, si el valor de forma de cada población no cumple con las restricciones del problema se debe aplicar una penalización con el fin de incrementar su valor de forma y alejarlo intencionalmente de la solución óptima. Este procedimiento se realiza con el fin de asegurar que en el resultado final no se tendrá en cuenta individuos que incumplan las restricciones dadas.

$$W_{penal} = W \left( 1 + \alpha \frac{NNSR}{NTR} \right)^{\beta} \quad (4)$$

Donde:

*NNSR*: Son los numero de iteraciones no satisfactorias.

*NTR*: Número total de restricciones.

Tanto  $\alpha$  y  $\beta$  son números asignados por el usuario dependiendo de la calidad de convergencia del algoritmo, este es uno de los ítems a mejorar en todo el campo de la optimización ya que por no tener un valor estandarizado puede presentar confusiones o algún margen de error dentro del algoritmo. Estos valores también pueden variar teniendo en cuenta el gasto computacional durante el proceso de iteración de algoritmo.

### 3.1.1. PROCESO DE MUTACIÓN.

Para buscar mejorar los resultados de las iteraciones de la población, a cada resultado se aplica un proceso de mutación buscando que estos tengan una mejoría a través del siguiente operador:

$$v_i = x_i^{best} + F(x_{r1} - x_{r2}) + F(x_{r3} - x_{r4}) \quad (5)$$

Para iniciar se selecciona el mejor valor de la población inicial, este corresponde al valor mínimo si se busca minimizar una variable.

$$x_i^{best} = \min(f(x_i)) \quad (6)$$

En donde:

$f = 0.5$  Por recomendación de la literatura

$x_{r1}; x_{r2}; x_{rn}$ , representan valores aleatorios que indican las poblaciones que sufrirán la mutación. Esta relación se presenta de forma vectorial dando como resultado una nueva población, en este caso mutada.

A continuación, se presenta la forma matricial de la población mutada, la cual se debe aplicar al operador para todas las poblaciones:

$$v_{ij} = \begin{Bmatrix} v_{i,j} & v_{i+1,j} & v_{i+2,j} & \dots & v_{n,j} \\ v_{i,j+1} & v_{i+1,j+1} & v_{i+2,j+1} & \dots & v_{n,j+1} \\ v_{i,j+2} & v_{i+1,j+2} & v_{i+2,j+2} & \dots & v_{n,j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{i,N} & v_{i+1,N} & v_{i+2,N} & \dots & v_{n,N} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Donde:

$n$  = Número de individuos

$N$  = Número de poblaciones

### 3.1.2. PROCESO DE COMBINACIÓN

Luego de obtener la población mutada se debe combinar con la población inicial a través de:

$$u_{ij} = \begin{cases} v_{ij}, & \text{Si (Número aleatorio)} \leq CR \text{ ó } j = j_{aleatorio} \\ x_{ij}, & \text{De otra manera} \end{cases} \quad (8)$$

En donde:

$CR = 0.8$  Por recomendación de la literatura y,

$j_{aleatorio}$  Es un número aleatorio de 0 al número de individuos que tenga la población.

Este procedimiento se aplica de la siguiente manera:

Se valida las condiciones de  $v_{ij}$  tomando un numero aleatorio y verificando si este es menor o igual al  $CR$ , si esta condición satisfecha el nuevo valor procederá de la población combinada, de lo contrario procederá de la población inicial.

Este proceso se aplica para todas las poblaciones que se tienen. Esta población combinada (organización de partículas) se presenta en forma de matriz como se indica a continuación:

$$u_{ij} = \begin{Bmatrix} u_{i,j} & u_{i+1,j} & u_{i+2,j} & \dots & u_{n,j} \\ u_{i,j+1} & u_{i+1,j+1} & u_{i+2,j+1} & \dots & u_{n,j+1} \\ u_{i,j+2} & u_{i+1,j+2} & u_{i+2,j+2} & \dots & u_{n,j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{i,N} & u_{i+1,N} & u_{i+2,N} & \dots & u_{n,N} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Donde:

$n$  = Número de individuos

$N$  = Número de poblaciones

Posteriormente se evalúan nuevamente las restricciones del problema con el fin de identificar los individuos que las incumplan para penalizarlos tal como se explicó en párrafos anteriores. A continuación, se realiza el proceso de selección en donde se elige a la población entre la inicial y la combinada que tenga un mejor (menor en caso de que se busque minimizar) valor de forma.

### 3.1.3. PSEUDO ALGORITMO DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

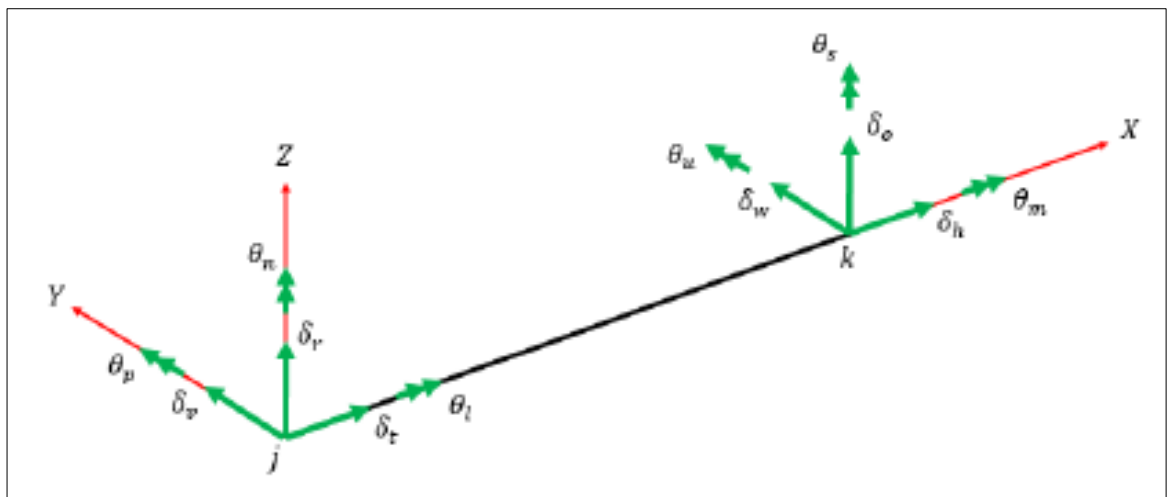
- a. Crear la población inicial.
- b. Aplicar proceso de mutación a población inicial.

- c. Verificar que todos los valores de la población generados se encuentren dentro de los rangos establecidos.
- d. Generar la población combinada.
- e. Verificar si estos nuevos valores cumplen con las restricciones de lo contrario aplicar el proceso de penalización a las variables.
- f. Seleccionar la mejor población entre la inicial y la combinada.
- g. Realizar este proceso N veces para determinar los valores óptimos y realizar una gráfica con la variable a optimizar vs las iteraciones, cuando en esta grafica se logre una convergencia.

#### 3.1.4. ANÁLISIS MATRICIAL PÓRTICOS EN 3D

Cuando se habla del análisis en pórticos en 3d se tiene en cuenta los 6 grados de libertad que se presentan por nodos los cuales van a representar el número máximo de desplazamientos y giros que se pueden presentar en las estructuras.

Figura 3. Grados de libertad pórticos 3D

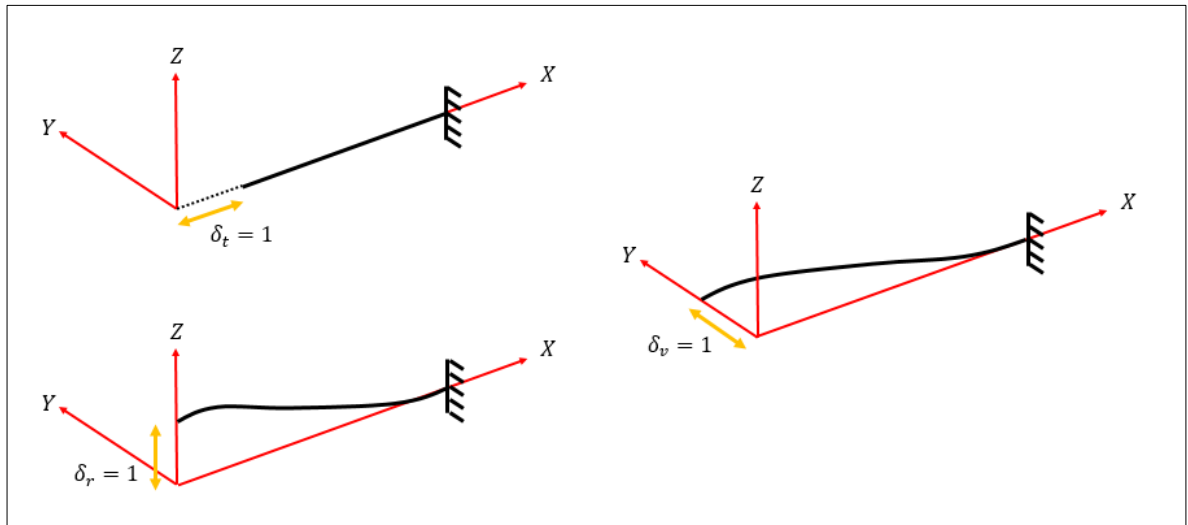


Fuente: Los autores



En cada barra se analiza un punto inicial y un punto final, hay que tener en cuenta que los elementos del pórtico no van en la misma dirección por lo cual para cada elemento se presentan coordenadas locales y las cuales se deben convertir a coordenadas globales para manejar las mismas configuraciones de los elementos.

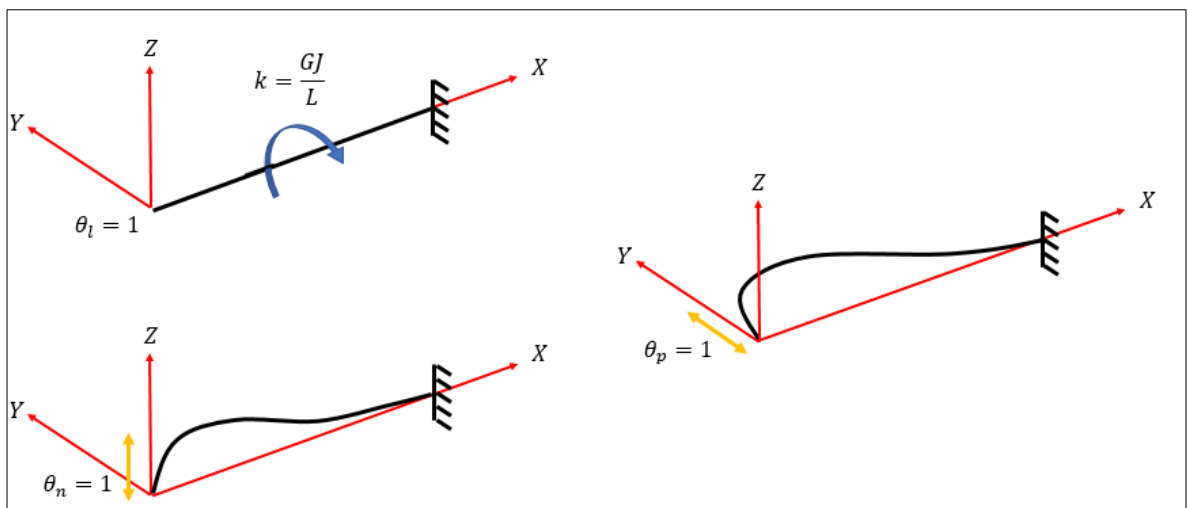
Figura 4. Fuerzas aplicadas pórticos 3D



Fuente: Los Autores

Un concepto que hay que tener claro es la torsión de cada barra la cual va a determinar una fuerza adicional que se aplica a los elementos.

Figura 5. Constante de torsión pórticos 3D 2



Fuente: Los Autores

Todas las fuerzas  $P_t$ ,  $P_r$ ,  $P_n$ ,  $P_s$ , se deben pasar a coordenadas globales y de igual forma los momentos, los cuales genera un sistema de ecuaciones lineales; ya con ese sistema de ecuaciones, se crea la matriz de rigidez en coordenadas locales.

A diferencia de los pórticos en 2D a esta matriz no se puede realizar una multiplicación entre matrices tales como  $T * K * T$  ya que se debe generar una matriz de transformación por cada elemento.

Figura 6. Matriz de rigidez coordenadas locales para pórticos 3D

$$\begin{bmatrix} P_t \\ P_v \\ P_r \\ M_l \\ M_p \\ M_m \\ P_h \\ P_w \\ P_o \\ M_m \\ M_u \\ M_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \delta_t \\ \delta_v \\ \delta_r \\ \theta_l \\ \theta_p \\ \theta_m \\ \delta_h \\ \delta_w \\ \delta_o \\ \theta_m \\ \theta_u \\ \theta_s \end{bmatrix}$$

Fuente: Los Autores

Para generar esta matriz de transformación se debe tomar como  $T = Rot$  dependiendo del Angulo que se desee rotar los elementos, este  $T$  se puede determinar como  $Rot_x$ ,  $Rot_y$  o  $Rot_z$ .

Figura 7. Asignación de matrices de rotación para x, y, z.

$\text{Rot\_X} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\text{angle}) & -\sin(\text{angle}) \\ 0 & \sin(\text{angle}) & \cos(\text{angle}) \end{bmatrix};$	→	Matriz de transformación en X
$\text{Rot\_Y} = \begin{bmatrix} \cos(\text{angle}) & 0 & \sin(\text{angle}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\text{angle}) & 0 & \cos(\text{angle}) \end{bmatrix};$	→	Matriz de transformación en Y
$\text{Rot\_Z} = \begin{bmatrix} \cos(\text{angle}) & -\sin(\text{angle}) & 0 \\ \sin(\text{angle}) & \cos(\text{angle}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$	→	Matriz de transformación en Z

Fuente: Los Autores

Tomando como  $T = Rot$  una matriz de 3x3, se va a ubicar en la matriz de 4x4 generando una matriz de 12x12 y se podría multiplicar por la matriz de rigidez de 12x12; al final se saca la matriz transpuesta y se multiplica por la matriz de rigidez y nuevamente por la matriz de transformación.

Figura 8. Matriz de Transformación.

Matriz de transformación	→	$T$	0	0	0	$[k_T] = [T]^T [k_i] [T]$ $[\delta'_T] = [k_T]^{-1} [P]$
		0	$T$	0	0	
		0	0	$T$	0	
		0	0	0	$T$	

Fuente: Los Autores

Finamente, se realiza el cálculo de una matriz de transformación y determinar la rigidez para cada una de las fuerzas (compresión o tracción) por lo cual no se va a presentar giros por lo cual solo se va a presentar una rigidez axial.

### 3.2 MARCO CONCEPTUAL

Actualmente, en el entorno de la guadua se está trabajando en las distintas aplicaciones que se le puede dar a la guadua *Angustifolia*, en construcción de estructuras más resistentes y eficientes en su comportamiento sísmico, son varios

los estudios que a nivel mundial se están realizando para comprobar su resistencia y su durabilidad, el cual busca construcciones más sostenibles a nivel ambiental sin perder sus características de resistencia.

Algunos conceptos para tener en cuenta:

**Algoritmo de Evolución Diferencial:** Son procesos en los cuales se realizan combinaciones de una determinada población de individuos o soluciones, que en una iteración determinada debe aproximarse a una solución óptima o llegar a la mejor solución de un problema en específico.

**Guadua:** Genero del bambú que se encuentra en América, utilizada en Colombia como material de construcción, debido a sus propiedades mecánicas.

**VIS:** Vivienda de Interés Social.

**Optimización:** Proceso mediante el cual se minimiza o se maximiza las propiedades o cualidades de un determinado proceso con el fin de hacerlo mejor o más eficiente.

**Sistema Constructivo:** grupo de materiales, elementos y habilidades, procedimientos y equipos particulares para construir una edificación.

**Sección Transversal:** Medida de los lados de la columna

En la actualidad, en busca de encontrar mejores y más resistentes y eficientes estructuras, se combinan métodos de construcción convencional y técnicas nuevas con el fin de mejorar los diseños que se proponen por diseñadores innovadores, que buscan además de las fortalezas que se mencionaron anteriormente, economía para la construcción de los mismos, esto se ha logrado con diferentes técnicas de mejora que conocemos como optimización, donde a través de algoritmos que generan combinaciones con diferentes opciones en cuanto a las características presentes en estos diseños se logra identificar las mejores opciones para construir de una manera más rápida y mejor consolidada con materiales ambientalmente amigables y más económicos, transfiriendo estas características a la ejecución del mismo proyecto, verificando que el desempeño de la estructura cumpla con las derivas o desplazamientos máximos admisibles dentro de la normativa vigente.

#### 4. ESTADO DEL ARTE

Para dar cumplimiento a la investigación se estudian distintos artículos acerca de la implementación de la guadua como material constructivo y artículos de optimización de costos en obras civiles, presentando tendencias y avances en este tipo de material y casos en donde la optimización de costos en la construcción de proyectos ha aportado a un mejor desarrollo de estas obras.

El artículo titulado "*Mechanical Properties of laminated bamboo under off axis compression*" escrito por los autores Dong Yang, Haitao Li, Zhenzua Xiong, Leonel Mimendi, Rodolfo Lorenzo, Ileana Corbi, Ottavia Corbi y Chaokun Hong en el año 2020 muestra pruebas de falla en diferentes tipos de guadua, en las cuales se utilizaron ecuaciones empíricas para tratar de predecir la resistencia fuera del eje y modulo elástico y aparente del Bambú, en este se concluye que la falla a compresión axial en el bambú de acuerdo con las diferentes pruebas realizadas se puede dividir en seis tipos en grados de falla 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°. Mostrando así que estas ecuaciones no logran predecir las características en una construcción, el cómo se comportaría ante un evento sísmico o que tolerancia en cuanto al movimiento que realiza una estructura normalmente y su máximo de tolerancia, sin embargo, esta investigación indica que el mejor Angulo de inclinación es de aprox. de 30° ya que sus propiedades como la resistencia al corte son las mayores que se obtuvieron con respecto a otros ángulos de trabajo [12].

El artículo escrito por Yubing Leng, Quingfeng Xu, Kent A. Harris, Lingzhu Chen, Kewei Liu y Xi Chen titulado "*Experimental study on mechanical properties of laminated bamboo beam to columns connection*" del año 2020, Se presentan 3 opciones de conexiones:

1. atornilladas convencionales con placas de acero ranuradas.
2. extendido en forma de T.
3. Conexión En forma de L.

Las cuales fueron probadas investigando el comportamiento de la región de conexión verificando deformación, deslizamiento y menor rigidez; utilizando cargas para evaluar el margen de seguridad en cada una de las conexiones, evidenciando la capacidad de cada conexión "I" "T" "L" y comprueba que la "T" y "L" son recomendables debido a que en estas conexiones se incrementan el límite plástico

de resistencia, y se conserva la capacidad de carga las conexiones en comparación con las conexiones en “I” [13].

A nivel de costos de construcción los autores Silva Giraldo, Duarte Mendoza y Mejía Jálabe presentan el artículo denominado *“Impacto de los costos de calidad en la ejecución de los proyectos de construcción en Colombia”* del año 2018 verificando por medio de dos métodos los costos y la calidad de cada una de las etapas de los proyectos de construcción, en estas metodologías se evalúan los costos desde la calidad en la construcción, por el método DEA, se evalúa el diseño optimizando la estructura haciendo más económico desde la concepción del proyecto [14].

Otro de los artículos donde se aborda esta temática es el de los autores Sara Lozano Serna, Ivonne Patiño Galindo, Adriana Gómez Cabrera y Andrés Torres, denominado *“Identificación de factores que generan diferencias de tiempo y costos en proyectos de construcción en Colombia”*, del año 2018, donde se hace un estudio sobre los costos por desviaciones en tiempos de construcción, analizando los sobre costos por aumento de tiempo de ejecución se puede analizar el diseño para evaluar la estructura optimizando las secciones de los elementos estructurales [15].

En el artículo de la revista, Revista internacional de informática e ingeniería denominado *“Cost Optimization of R.C.C. T-Beam Girder”* .escrito por Rajesh F. Kale, N.G.Gore y P.J.Salunke, se expone el caso de minimizar el costo total en el proceso de diseño de un puente considerando el costo de cada material y mano de obra para una viga en especial, la viga RCC T, teniendo en cuenta variables como la profundidad de la losa del tablero, el ancho del alma de la viga, y la profundidad de la viga, siguiendo las especificaciones del congreso de carreteras de la india IRC-21:2000, el diseño y análisis del modelo se realiza a través del programa Matlab de forma no lineal con una programación (NLPP) por SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique), la cual busca eliminar las restricciones introduciendo una función de penalización, este proceso de optimización se realiza para diferentes grados de concreto y acero, dando como resultado que esta función de penalización se puede utilizar para resolver problemas de optimización no lineales, y determinando que el costo de la viga depende de la plataforma, espesor de la losa, profundidad de la viga, grado de acero y grado de concreto con el que se vaya a construir [16].

Los autores Flavio Stochino y Fernanado Lopez Gayarre, nos presentan en el artículo *“Reinforced Concrete Slab Optimization with Simulated Annealing”* [17] de las universidades de Cagliari de Italia y de Oviedo en España, nos muestra el

desarrollo de un método de optimización basado en el algoritmo SA (Simulated annealing), para determinar la distribución óptima de los encofrados de las losas y su espesor mínimo, a través del estado límite de flexión y los costos de materiales, encontrando como resultado las características de la losa que minimiza el costo estructural como  $H=11.8$  cm, logrando así un proceso más adecuado y rentable al momento de desarrollar estos proyectos.

El artículo denominado *“Time-cost optimization model proposal for construction projects with genetic algorithm and fuzzy logic approach”* de Cemil Akcay perteneciente a la facultad de arquitectura de la Universidad de Estambul en Turquía junto a Hatice Acar Yildirim, exponen en este artículo el desarrollo de un modelo de optimización del tiempo y costo de proyectos de construcción a través de un enfoque de lógica difusa y un algoritmo genético, estos conjuntos difusos se utiliza para modelar incertidumbres y el algoritmo genético es utilizado para adquirir el costo y la duración mínima del proyecto, presentando como resultado un modelo difuso de optimización tiempo - costo de acuerdo con diferentes niveles de riesgo determinados por los tomadores de riesgo [18].

En el artículo del año 2018 *“Evolutionary Algorithm Performance Evaluation in Project Time-Cost Optimization”* escrito por A.P. Chassiakos y G. Rempis de la universidad de Patras en Grecia muestra una comparativa entre una serie de algoritmos evolutivos, para evaluar el potencial de rendimiento mediante dos parámetros de eficacia; La calidad de solución y el tiempo de procesamiento para obtener la solución, los algoritmos a desarrollar fueron algoritmos de base evolutiva, algoritmos genéticos (GA), los algoritmos de optimización de colonias (ACO) o de optimización de enjambres de partículas (PSO). Cada uno con sus variaciones, demostrando así que no existe un método único que supere claramente en la efectividad de encontrarla solución más óptima y la eficacia en el cálculo (Tiempo de procesar la información), inclusive se recomienda utilizar diferentes métodos para una mayor probabilidad de mejores resultados [19].

En el artículo del año 2015, *“Evaluación de los costos de construcción de sistemas estructurales para viviendas de baja altura y de interés social”*, Escrito por Julián Carrillo, Fabian Echeverri y William Aperador de la Universidad Militar Nueva Granada, se realiza un análisis comparativo en los costos de construcción de vivienda VIS más utilizados comúnmente en la construcción colombiana que son, los muros de mampostería confinada, muros con malla electrosoldadas y muros de concreto con fibras de acero, concluyendo que el método más económico es el de muros de concreto con malla electro-soldada, por lo cual en este estudio se

pretende también hacer más económica una propuesta que se presenta que son muros en mampostería confinados por dichas columnas que son objeto de optimización en este trabajo [20].

En el artículo del año 2019, *"Innovación en el sector de la construcción y potencial de aplicación en Colombia"* de Rodrigo N. Quimbay Herrera, Msc, es bastante clara la idea de llevar la innovación en la construcción a niveles más altos, ya que se llevan utilizando los mismos materiales y prácticamente los mismos diseños a través de los años, en este artículo se habla de que el profesional de la construcción debe considerar las innovaciones en todos los casos, no solo al nivel de producción de nuevos y mejores materiales, sino orientar a la reducción de costos y tiempos de construcción marcando la diferencia a una escala competitiva que le permita ser más eficiente; En este se numera ciertos avances que se produjeron en Colombia desde el año 2009 aproximadamente en los cuales cita: 1. Factibilidad de uso de materiales más eficientes e industrializados (concreto), 2. Posibilidad de utilizar materiales durables, resistentes y ligeros (ligado a la guadua), 3. Optimización de la producción del concreto en cuanto al costo, 4. Implementación de software actualizado para los procesos de diseño mejorando así los tiempos y los costos de construcción, Avances que de manera intrínseca se plantean en el presente proyecto con el fin de realizar la optimización del proyecto base [21].



## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GENERAL**

- Calcular el costo mínimo del concreto para la construcción de las columnas de una vivienda de interés social considerando restricciones respecto a desplazamiento máximo.

### **5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar la investigación referente a las características constructivas, materiales y sistema constructivo del prototipo a evaluar.
- Acoplar los algoritmos de análisis matriciales de pórticos.
- Acoplar el análisis matricial al algoritmo DEA.
- Calcular el área de la sección transversal óptima de las columnas de una vivienda de interés social en guadua y concreto que nos permitan reducir costos y cumplir con los requerimientos normativos.

## **6. ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **6.1 ALCANCES**

Realizar el proceso de optimización de las secciones de las columnas en concreto presentes en el diseño y estimar de acuerdo con las dimensiones, las reducciones en cuanto al costo del material (concreto) de la estructura.

Presentar el proceso de optimización de la sección de las columnas en el programa Matlab, evidenciando el cumplimiento de los estándares técnicos establecidos en la Norma Sismo Resistente 2010, vigente en Colombia.

### **6.2 LIMITACIONES**

Esta optimización solamente se realizará para este diseño específico de Vivienda de Interés Social, propuesto en el trabajo de grado de Nidia Nieto y Antonio Trujillo de la Universidad Católica de Colombia, no se puede estandarizar en otros diseños o propuestas ya que cada diseño tiene diferentes características que deberá ser considerado por aparte.

Una de las dificultades presentes es la recopilación de información debido a la pandemia debido a que la investigación se limita a lo que se encuentra en la red, siendo imposible realizar visitas a entidades educativas, o normativas como la asociación colombiana de ingenieros, entre otras.

Por parte de la normativa, las restricciones de esta investigación están designados por la NSR-10, en cuanto a las derivas máximas y las dimensiones mínimas de diseño para los elementos a construir.

Uso de programas que nos permiten optimizar la sección de las columnas.

## 7. METODOLOGÍA

Para desarrollar esta investigación, como primera medida se recopiló la información referente a las características físicas, y mecánicas del prototipo de vivienda que se había planteado en el trabajo de grado tomado como base, con el fin de conocer su sistema constructivo, materiales y fuerzas que se aplican en este, teniendo la oportunidad de entrevistarnos con Nidia Nieto, una de las personas que desarrollo la tesis y la cual nos aclaró detalles acerca del sistema estructural de la vivienda y cómo se conformaban las columnas y demás generalidades del diseño de la vivienda que se propuso en ese trabajo de grado.

Con la información seleccionada y utilizando la herramienta computacional Matlab se compilaron las características iniciales de la estructura como lo son el Número de elementos a analizar, Área, Peso, Modulo de elasticidad, Constante de torsión, los cuales son ingresados y organizados en este programa.

Con los datos generados por Matlab, se ingresa la codificación referente al desarrollo del algoritmo con el cual se pretende realizar la optimización como son las restricciones, y las matrices de rigidez y transformación, las cuales interactúan entre ellas ejecutando combinaciones con los datos ingresados, con el fin de mejorar en este caso las columnas, teniendo en cuenta la Norma Sismo Resistente NSR-10, por la cual se rige la construcción en el país.

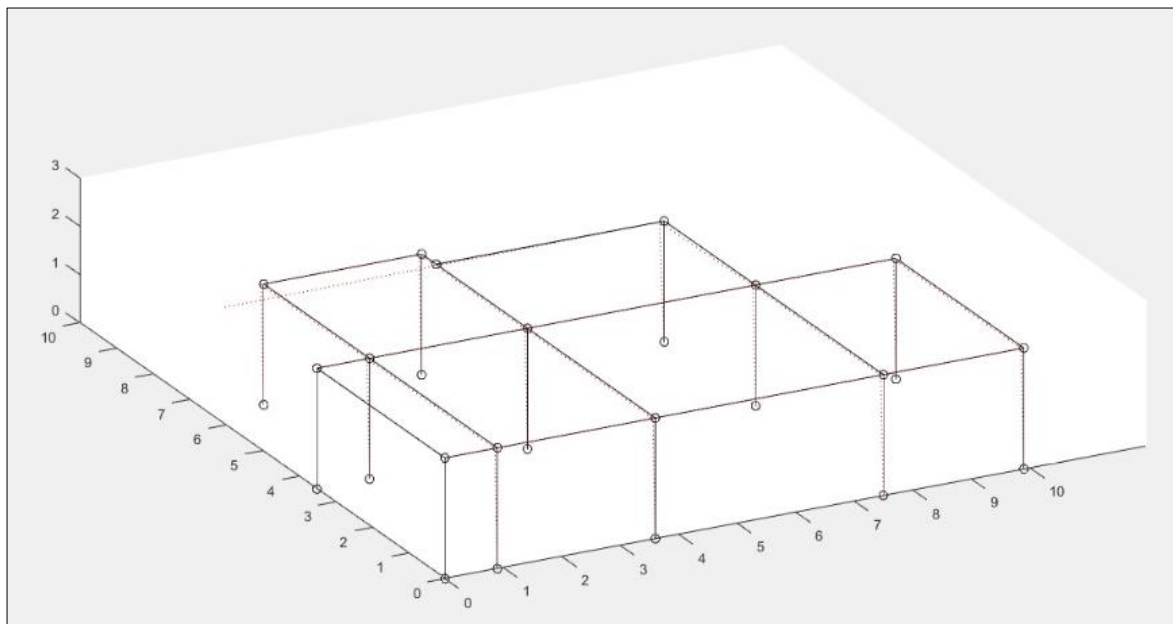
Utilizando el análisis matricial con el algoritmo DEA, se estimará la mejor sección de las columnas en concreto, tal que se garantice el mismo desplazamiento horizontal, modificando el peso y el costo.

Una vez obtenidos los datos en cuanto a la Optimización de la Sección Transversal de las columnas se procede a realizar la investigación de costos referentes al concreto, material de construcción que de acuerdo con los resultados obtenidos no solo varia en cantidad si no en sus propiedades mecánicas, por lo tanto, se modificó el costo inicialmente planteado generando los resultados que se muestran en el presente trabajo de grado.

## 8. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

### 8.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Figura 9. Figura tridimensional modelo vivienda (Matlab)

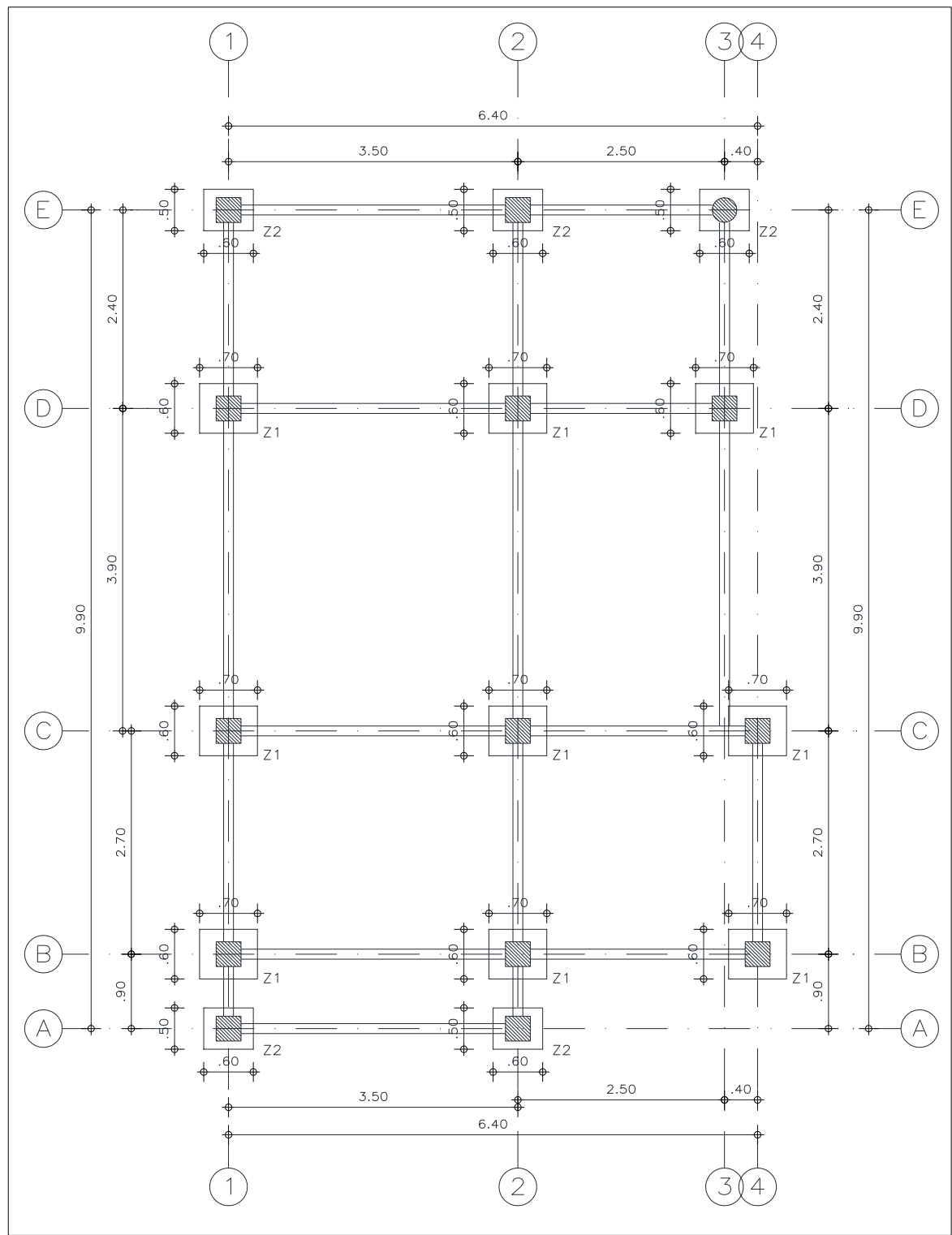


Fuente: Los autores

La geometría de los elementos inicialmente consiste en columnas de concreto de 0.30 m x 0.30 m, cabe resaltar que, en el desarrollo de este proyecto, se aplica una modificación a la sección transversal inicial de las columnas de la estructura para poder ser usada en una zona de amenaza sísmica alta, intermedia y baja, sin afectar su rendimiento sísmico, por tal razón, estas secciones podrían variar entre la sección actual hasta una de 20x20 cm.

En la siguiente imagen, de manera esquemática se puede apreciar la distribución de los elementos estructurales, entre las cuales se puede observar que la distancia entre columnas varía entre 0.9 m y 3.9; cabe resaltar que esta planta estructural corresponde al primer análisis y/o diseño realizado, es decir, al trabajo de grado desarrollado por los estudiantes Nidia Nieto y Antonio Trujillo durante su proceso de grado para optar por el título de ingenieros civiles.

Figura 10. Planta General vivienda.



Fuente: Los autores

## 8.2 CARACTERISTICAS MECANICAS.

Tabla 1. Propiedades mecánicas y geométricas de los elementos

Tipo	Sección (cm)	Área (m <sup>2</sup> )	E (MPa)	I (m <sup>4</sup> )	G (MPa)	J (m <sup>4</sup> )
Columna	30 x 30	0.0900	17872.05	0.000675	7446685.5	0.001142
Columna	25 x 25	0.0625	17872.05	0.000326	7446685.5	0.000551
Columna	30 x 30	0.0900	17872.05	0.000675	7446685.5	0.001142
Columna	30	0.0707	17872.05	0.000398	7446685.5	0.000795
Viga	0.1 x 0.1	0.000001	17872.05	8.33E-14	7446685.5	1.41E-13

Donde:

*E*: Módulo de elasticidad

*I*: Inercia

*G*: Módulo de corte

*J*: Constante de torsión

## 8.3 RESTRICCIONES

La restricción del desplazamiento está dada por la deriva máxima para cualquier piso, determinada de acuerdo con la NSR-10, la cual no puede exceder los límites establecidos en la Tabla A.6.4-1, la cual se indica a continuación:

Figura 11. Derivas máximas expresadas como porcentajes de  $h_{pi}$

Estructuras de:	Deriva máxima
concreto reforzado, metálicas, de madera, y de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.1.3	1.0% $\left( \Delta_{\max}^i \leq 0.010 h_{pi} \right)$
de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.1.4	0.5% $\left( \Delta_{\max}^i \leq 0.005 h_{pi} \right)$

Fuente: Tomado de (NSR - 10).

## 9. ALGORITMOS ACOPLADOS

### 9.1 DATOS INICIALES

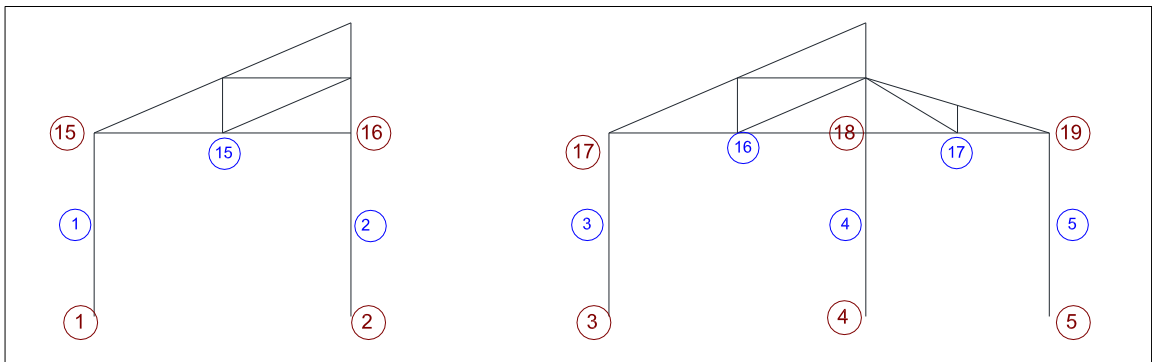
Se inicia con la numeración de nodos y elementos de la estructura, con estos datos se identifican las coordenadas de las columnas para ingresarlos en la pestaña de Data frame 3D, del programa de Matlab.

*Input Number of elements*

$NE = 34;$

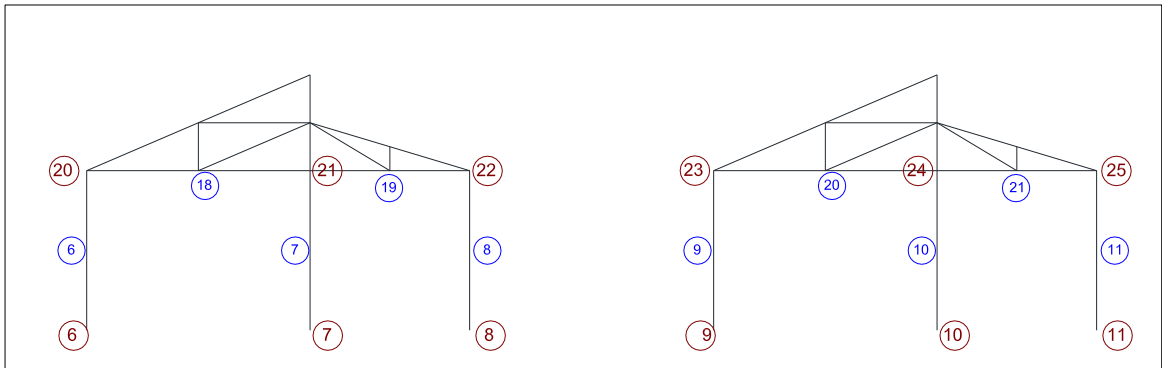
A través del programa de AutoCAD se realizan los esquemas de la asignación de la numeración de nodos y elementos de la estructura.

Figura 12. Numeración de nodos y elementos Ejes A y B respectivamente



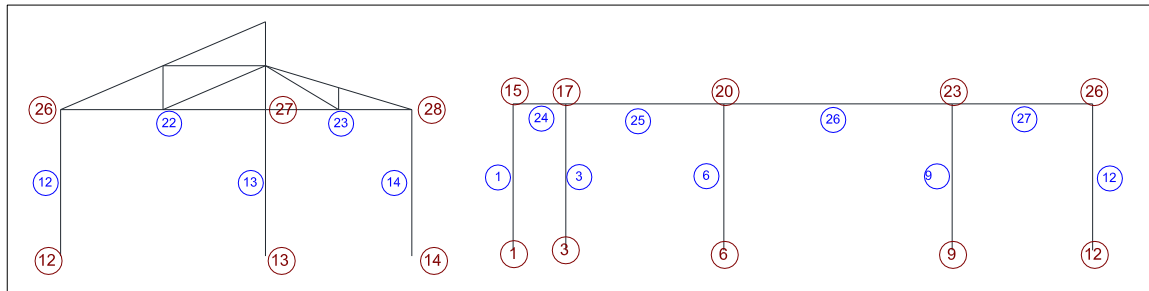
Fuente: Los autores

Figura 13. Numeración de nodos y elementos Ejes C y D.



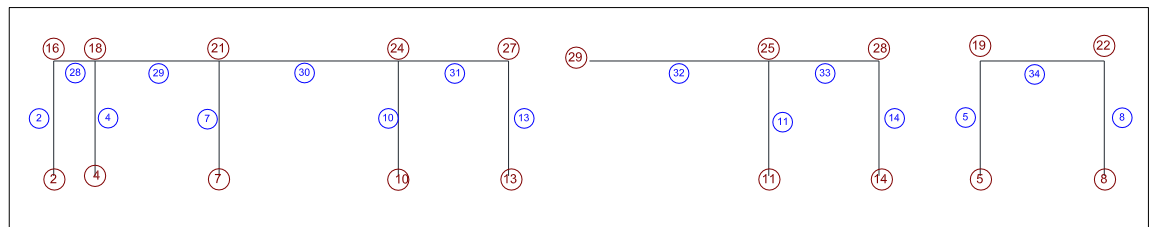
Fuente: Los autores

Figura 14. Numeración de nodos y elementos Ejes E y 1



Fuente: Los autores

Figura 15. Numeración de nodos y elementos Ejes 2,3 y 4



Fuente: Los autores

Se realiza la numeración de los elementos mediante la codificación, con coordenadas de vector (x,y,z) en la pestaña frame 3d,a continuación, se ingresan los puntos de inicio y final de los elementos con la numeración mencionada, con el propósito de asignar los elementos dentro del programa.

Posteriormente se asigna el área de los elementos, esta se determina a partir de la sección transversal. En donde:

Área

$A = 0.09$  Para las 13 columnas

$A = 0.000001$  Para las 20 vigas en guadua, este valor se genera con el fin de que no tenga una consideración relevante en la programación.

Continuando con los datos iniciales, se ingresa el módulo de elasticidad el cual se calcula a través de la ecuación  $3900\sqrt{f_c}$ , para los 34 elementos.

$E = 17872045$



El valor de la inercia se determina a través de la fórmula:  $I_x = bh^3/12$  e  $I_z = b^3h/12$ .

$I_y = 0.000675$  Para las 13 columnas

$I_z = 0.000675$  Para las 13 columnas

A continuación, se realiza la asignación del módulo de corte.

$G = 7446685.504$  Para los 34 elementos tanto columnas como vigas.

El siguiente dato que se deberá registrar es la constante de torsión, la cual nos permite medir la resistencia de los elementos a la acción de la torsión ocasionada por fuerzas externas.

$j = 0.0011421$  Para las 13 columnas

$j = 0.000000000000141$  Para las 20 vigas

A continuación, se ingresan los grados de libertad de la estructura, esto se debe realizar por nodo en código binario, siendo el número 1 asociado a un punto que está restringido y el cero hace referencia a un punto libre.

De los últimos datos a ingresar son las cargas, estas se determinan a través de un avalúo de carga presentado a continuación.

## 9.2 ANÁLISIS DE CARGAS

### 9.2.1 CARGA MUERTA (D)

El peso propio de los elementos estructurales se asignó teniendo en cuenta el peso propio de los elementos que conforman la cubierta liviana:

Tabla 2. Asignación de Carga muerta.

Cercha en guadua	0.13 kN/m <sup>2</sup>
Teja termo acústica	0.06 kN/m <sup>2</sup>
Acabados e iluminación	0.25 kN/m <sup>2</sup>
<b>CM</b>	<b>0.31 kN/m<sup>2</sup></b>

### 9.2.2 CARGA VIVA (L)

La carga viva se ha seleccionado de los valores proporcionados por la Norma Sismo Resistente NSR-10, teniendo en cuenta que para cubiertas inclinadas con más de  $15^\circ$  de pendiente en estructura metálica o de madera con imposibilidad física de verse sometidas a cargas superiores se podría usar una carga de  $0.35\text{kN/m}^2$ .

### 9.2.3 CARGAS DE VIENTO (W)

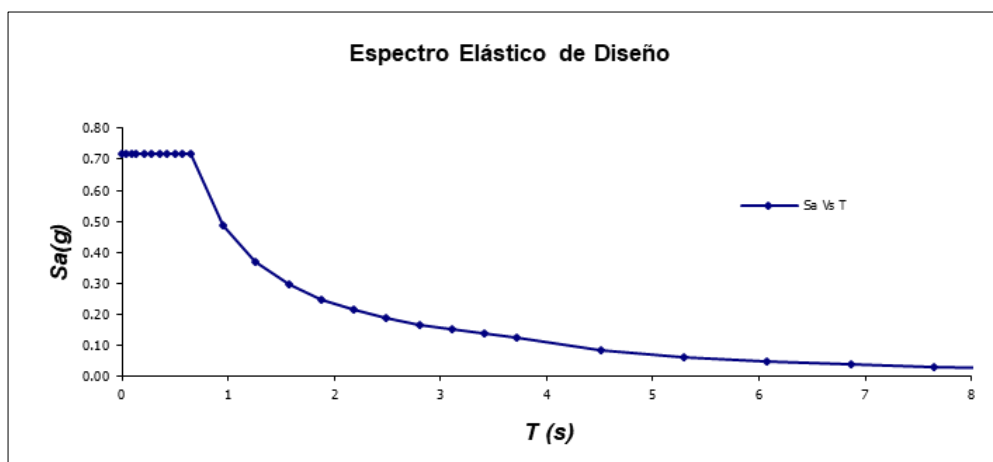
Se consideraron los efectos de las cargas de viento siguiendo los requisitos y procedimientos dados en el reglamento NSR-10, título B, método simplificado especificado en la sección B.6.4. únicamente para realizar el diseño de cubiertas, posterior al análisis de viento, se obtuvo una presión total de viento de  $0.40\text{ kN/m}^2$ .

### 9.2.4 CARGA SISMICA (E)

De acuerdo con el Mapa de Zonificación sísmica del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 el proyecto se encuentra localizado en Zona de Amenaza sísmica Alta.  $A_a$ :  $0.25g$ ;  $A_v$ :  $0.25g$ .

A continuación, a manera de resumen se presenta una tabla en donde se indican las cargas por aplicar en cada uno de los nodos previamente definidos:

Figura 16. Espectro elástico de diseño.



Fuente: Los autores

Tabla 3. Análisis sísmico F.H.E.

**ANÁLISIS SÍSMICO  
FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE**

*Periodo fundamental de la edificación:*

$$T_a = C_t h^\alpha \quad C_t = 0.047 \quad h = 2.50 \quad m$$

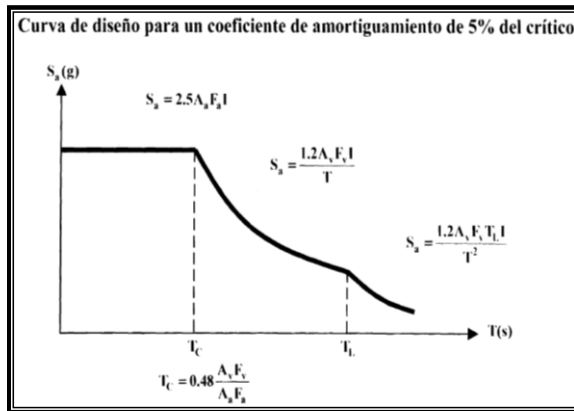
$$\alpha = 0.90$$

$$T_a = 0.11 \text{ seg}$$

$$C_u = 1.29$$

$$C_u T_a = 0.14 \text{ seg}$$

$$T_{\text{adoptado}} = 0.14 \text{ seg}$$



*Zona de Amenaza Sísmica*

Zona= **ALTA**      Ao= **n/a**  
Tc= **0.65**      Fa= **1.15**  
TL= **3.72**      Fv= **1.55**

*Efectos Locales*

Tipo de Perfil      Av = **0.25**  
**C**      Aa = **0.25**

*Grupo de Importancia*

Grupo = **I**  
I = **1.00**

El periodo de la estructura se encuentra en la zona de meseta.

$$S_a = 0.719$$

*Calculo de la Masa de la estructura*

N+2.50      Area= **60.75** m<sup>2</sup>      CR= **0.19** T/m<sup>2</sup>

W = 11.47 Ton  
M = 1.17 T.seg<sup>2</sup>/m  
M total= **1.17 T.seg<sup>2</sup>/m**

$$V_s = S_a * g * M$$

$$V_s = 8.23 \text{ Ton}$$

$$F_x = C_{vx} V_s \quad \text{donde}$$

$$C_{vx} = \frac{m_x h_x^k}{\sum m_i h_i^k} \quad K = 1.00$$

NIVEL	h <sub>x</sub>	m <sub>x</sub>	w <sub>x</sub>	m <sub>x</sub> h <sub>x</sub> <sup>k</sup>	C <sub>vx</sub>	F <sub>x</sub>
N+2.50	<b>2.50</b>	1.17	11.45	2.9	1.000	8.23
TOTALES		1.17	11.45	2.9	1.00	8.23

*Descripción de irregularidades de la estructura*

	Descripción	Valor de $\Phi$	Tipo
PLANTA	$\Phi_p$	<b>1.00</b>	
ALTURA	$\Phi_a$	<b>1.00</b>	
REDUNDANCIA	$\Phi_r$	<b>1.00</b>	

Como la edificación se encuentra en la meseta del espectro, según el numeral A.3.3.3 de la NSR-10 el valor de R es:

$$R = \Phi_p \Phi_a \Phi_r R_o$$

$R_o = 5.00$   
**R = 5.00**

Para el análisis Sísmico del modelo se usa: 100% **0.200**  
30% **0.060**

Ro: Coeficiente de capacidad de disipación de energía básico.  
 R: Coeficiente de capacidad de disipación de energía, para ser empleado en el diseño.  
 fa: Coeficiente de reducción de R causado por irregularidades en altura de la edificación.  
 fp: Coeficiente de reducción de R causado por irregularidades en planta de la edificación.  
 fr: Coeficiente de reducción de R causado por ausencia de redundancia en el sistema estructural resistencia sísmica.  
 Fa: Coeficiente de ampliación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos.  
 Fv: Coeficiente de ampliación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios.  
 Sa: Aceleración espectral (g).  
 Aa: Aceleración horizontal pico efectiva de diseño. Aa=0.15g.  
 Ao: Aceleración horizontal pico efectiva del terreno en superficie (g).  
 Av: Aceleración que representa la velocidad horizontal pico efectiva de diseño. Av=0.20g.  
 T: Periodo de vibración del sistema elástico, en segundos.  
 Tc: Periodo corto, en segundos.  
 TL: Periodo largo, en segundos.

Tabla 4. Resumen de cargas aplicadas.

Nodo	kN	kN	kN	kN	1.0*Sx	0.3*Sy	1.2D+1.0L
14	0.12	0.29	0.33	0.11	1.07	0.32	0.51
15	0.12	0.29	0.33	0.11	1.07	0.32	0.51
16	0.50	1.16	1.32	0.44	4.27	1.28	2.03
17	0.80	1.88	2.15	0.72	6.92	2.08	3.29
18	0.31	0.72	0.82	0.27	2.65	0.80	1.26
19	0.91	2.12	2.43	0.81	7.83	2.35	3.72
20	1.66	3.88	4.44	1.48	14.31	4.29	6.80
21	0.75	1.76	2.01	0.67	6.48	1.95	3.08
22	0.87	2.03	2.32	0.77	7.47	2.24	3.55
23	1.59	3.71	4.23	1.41	13.66	4.10	6.49
24	0.72	1.68	1.92	0.64	6.19	1.86	2.94
25	0.33	0.77	0.88	0.29	2.85	0.85	1.35
26	0.61	1.41	1.61	0.54	5.20	1.56	2.47
27	0.27	0.64	0.73	0.24	2.36	0.71	1.12

Fuente: Los autores

### 9.2.5 DEA

Para el caso de los datos del algoritmo de evolución diferencial, los datos iniciales a registrar son los de los valores mínimos y máximos de área los cuales se va a iterar, el máximo desplazamiento, el número de individuos, el factor CR, el valor de amplificación y las matrices de mutación y combinaciones, con las siguientes codificaciones:

*Input the parameters of the Differential Evolution Algorithm*

*Fix the maximum and minimum values of area*

*Val Min=0.0625;*

*Val Max=0.09;*

*Fix the maximum displacement*

*Disp max = 0.025;*

*Number of Individuals*

*ND = NEl;*

*Number of Population*

*NV = 100;*

*Select the case of mutation operator*

*Type Mutation = 3;*

*Amplification Factor*

*FA = 0.5;*

*Crossover Factor*

*CR = 0.8;*

*Maximum number of generation*

*MNG = 100;*

*Number of executions*

*NE = 1;*

Select the case of penalized weight

Penal Weight = 1;

Y por último se agrega el costo del concreto

Cont concrete per  $m^3$

Cost concrete = 417475;

Con esta información se procede a calcular la población viable que arroja los mejores resultados en cada iteración, para luego determinar los valores de forma, estos se validan si no cumplen con las restricciones del problema para aplicarles un valor de penalización buscando alejar el valor de una solución óptima. Logrando así que el resultado final no tenga individuos que incumplan las restricciones dadas.

Ya con estas restricciones asignadas se genera la matriz de rigidez con la siguiente codificación:

Figura 17. Matriz de rigidez Matlab

% Stiffness Matrix (SM)									
SM = [E(i)*Area(i)/L(i)									
0	12*E(i)*Iz(i)/L(i)^3	0	0	0	0	0	0	-E(i)*Area(i)/L(i)	0
0	0	12*E(i)*Iy(i)/L(i)^3	0	0	0	6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0	0	-12*E(i)*Iz
0	0	0	0	G(i)*J(i)/L(i)	0	0	0	0	0
0	0	-6*E(i)*Iy(i)/L(i)^2	0	0	4*E(i)*Iy(i)/L(i)	0	0	0	0
0	6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0	0	0	0	4*E(i)*Iz(i)/L(i)	0	0	-6*E(i)*Iz
-E(i)*Area(i)/L(i)	0	0	0	0	0	0	0	E(i)*Area(i)/L(i)	0
0	-12*E(i)*Iz(i)/L(i)^3	0	0	0	0	-6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0	0	12*E(i)*Iz
0	0	-12*E(i)*Iy(i)/L(i)^3	0	0	6*E(i)*Iy(i)/L(i)^2	0	0	0	0
0	0	0	0	-G(i)*J(i)/L(i)	0	0	0	0	0
0	0	0	-6*E(i)*Iy(i)/L(i)^2	0	2*E(i)*Iy(i)/L(i)	0	0	0	0
0	6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0	0	0	0	2*E(i)*Iz(i)/L(i)	0	0	-6*E(i)*Iz

Fuente: Los Autores

Figura 18. Continuación Matriz de rigidez Matlab

0	0	-E(i)*Area(i)/L(i)	0	0	0	0	0	0	0
0	6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0	-12*E(i)*Iz(i)/L(i)^3	0	0	0	0	6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0
0	0	0	0	-12*E(i)*Iy(i)/L(i)^3	0	0	0	-6*E(i)*Iy(i)/L(i)^2	0
0	0	0	0	0	-G(i)*J(i)/L(i)	0	0	0	0
0	0	0	0	6*E(i)*Iy(i)/L(i)^2	0	0	2*E(i)*Iy(i)/L(i)	0	0
0	4*E(i)*Iz(i)/L(i)	0	-6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0	0	0	0	2*E(i)*Iz(i)/L(i)	0
0	0	E(i)*Area(i)/L(i)	0	0	0	0	0	0	0
0	-6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0	12*E(i)*Iz(i)/L(i)^3	0	0	0	0	-6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0
0	0	0	0	12*E(i)*Iy(i)/L(i)^3	0	0	6*E(i)*Iy(i)/L(i)^2	0	0
0	0	0	0	0	G(i)*J(i)/L(i)	0	0	0	0
0	0	0	0	6*E(i)*Iy(i)/L(i)^2	0	0	4*E(i)*Iy(i)/L(i)	0	0
0	2*E(i)*Iz(i)/L(i)	0	-6*E(i)*Iz(i)/L(i)^2	0	0	0	0	4*E(i)*Iz(i)/L(i)	0

Fuente: Los Autores

Con la matriz de rigidez generada y con la matriz de rotación *Rot*, estas se combinan y se operan con el fin de determinar la matriz de transformación. Finalmente se realizan los cálculos correspondientes a fuerzas internas, y desplazamientos,

Para cumplir con requerimientos de la estructura, para luego hallar el área más conveniente para realizar la optimización del costo.

## 10.RESULTADOS

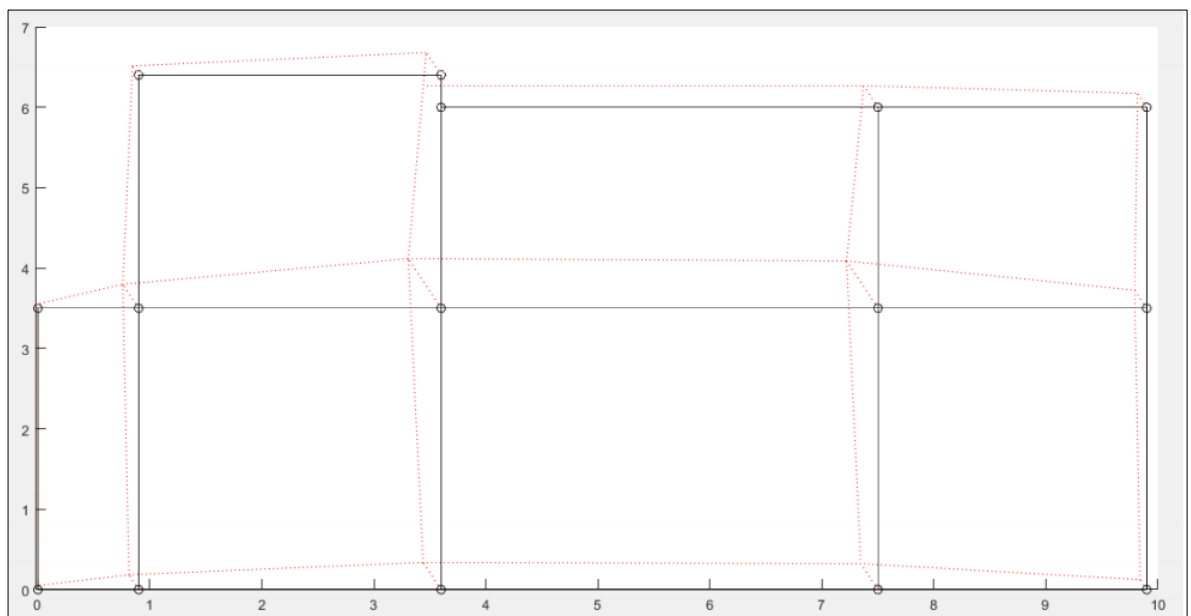
### 10.1 DISEÑO DE COLUMNAS

Posterior al registro de los datos en el programa, el primer resultado obtenido es un esquema de un modelo tridimensional de la estructura.

Teniendo en cuenta lo indicado en el título A.6.4 del Reglamento Sismo Resistente Colombiano, se limita el algoritmo con base al desplazamiento permisible presentado en la norma, en la cual, de manera específica se indica que la deriva máxima para cualquier piso no debe exceder el 1.0% de la altura del piso, cabe resaltar que la estructura objeto de análisis cuenta con una altura de 2.50m, por lo cual el límite indicado para definir la restricción del desplazamiento fue de 0.025m (2.5cm).

Observando la siguiente grafica puede evidenciarse de manera esquemática que los desplazamientos se encuentran dentro del límite establecido en la normativa colombiana; cabe resaltar que en caso de que este desplazamiento superara los 0.025m, el algoritmo de optimización no converge por lo cual se debería replantear el concepto.

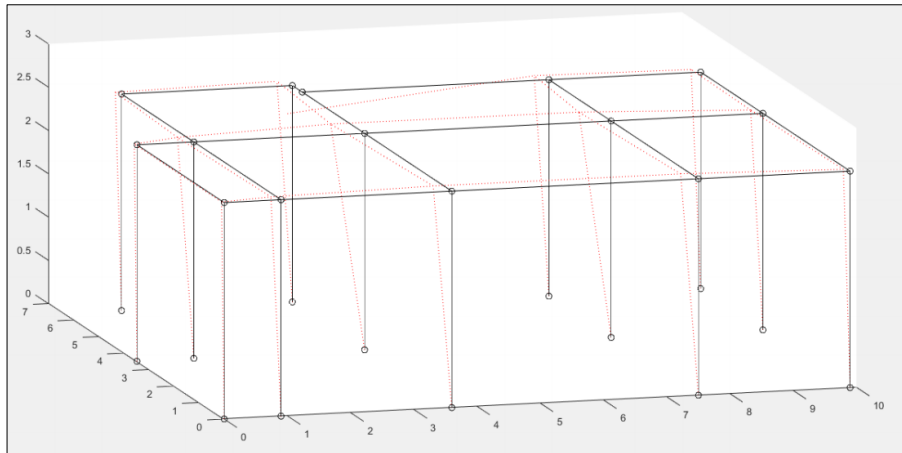
Figura 19. Vista planta prototipo vivienda, desplazamientos



Fuente: Los autores



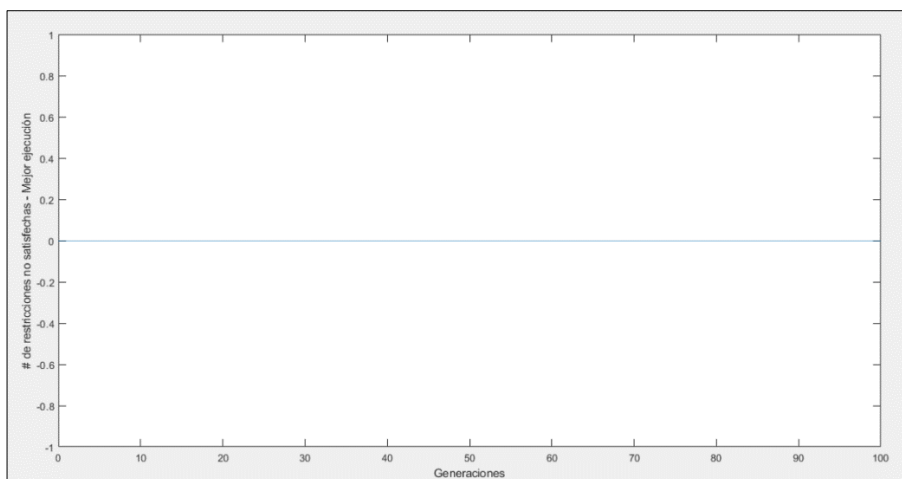
Figura 20. Desplazamientos obtenidos, modelo tridimensional



Fuente: Los autores

Una vez el algoritmo converge y arroja un resultado, este pasa a ser analizado si cumple o no cumple las restricciones asignadas, por lo cual lo que hace el algoritmo es escoger estas últimas áreas que se generan y pasan a un análisis matricial, el cual al ser ejecutado, se confirma si el resultado es mayor o menor a la deriva máxima, si es menor a la deriva se cumple las restricciones, pero si es mayor a la restricción no cumple, por lo cual, en la gráfica resultante no se visualizaría una línea horizontal, sino que por el contrario tendría una tendencia ascendente, indicando las restricciones insatisfechas; para que este grafica sea confiable debe estar obligatoriamente en cero como se demuestra a continuación, si la desviación estándar es igual a cero se puede decir que el algoritmo converge.

Figura 21. Número de restricciones no satisfechas.



Fuente: Los autores

Al momento de correr el programa en el algoritmo desarrollado, se obtienen los resultados correspondientes a la mejor área transversal de cada columna, y posteriormente, con base en la codificación generada se obtiene la optimización del costo de la estructura, el cual arroja un valor de \$ 913.238, para este análisis el algoritmo toma como base el volumen de concreto utilizado y el costo por m<sup>3</sup> consultado en el mercado a la fecha actual.

Dicho lo anterior la optimización resultante presenta una reducción de área, pasando de columnas de 0.30mx0.30m a columnas de 0.25mx0.25m, la cual podría ser utilizada en una zona de amenaza sísmica intermedia, o a columnas de 0.20x0.20m en zonas de amenaza sísmica baja.

## 10.2 ANÁLISIS DE COSTOS

El sector de la construcción es una de las ramas productivas en Colombia que experimenta más altas y bajas en materia económica, esto se debe no solo a la variación de precios de los componentes para la fabricación de materiales que son depurados de manera constante, si no que debido a las innovaciones en materia de procesos constructivos se exigen más y mejores materias primas para ejecutar un determinado tipo de vivienda incluyendo en los precios directamente de los insumos [22].

Realizando un Análisis de las estadísticas de los costos de la construcción de vivienda de los últimos 4 años emitidas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en Colombia se ha incrementado de manera gradual los costos de la construcción, presentando una tendencia al alza desde el año 2019, tal como se muestra a continuación:

Figura 22. Índice de Costos de la Construcción de Vivienda – ICCV.

Índice de Costos de la Construcción de Vivienda - ICCV												
AS. ICCV - Variación mensual, año corrido y anual, total ICCV (2017 - 2021)												
Meses	Mensual					Año corrido					Anual	
	2017	2018	2019	2020	2021	2017	2018	2019	2020	2021	2017	2018
Enero	1,78	0,98	0,74	0,87	0,78	1,28	0,98	0,74	0,87	0,78	3,49	4,47
Febrero	1,79	0,47	0,60	0,90	0,67	1,00	1,46	1,34	1,77	1,46	4,19	3,20
Marzo	0,64	0,37	0,47	0,37	1,22	1,46	1,83	1,81	2,15	2,69	4,30	2,92
Abril	0,07	0,14	0,10	0,33	<b>0,69</b>	3,73	3,87	1,91	2,49	<b>3,40</b>	4,04	3,00
Mayo	0,04	0,15	0,09	0,09		3,77	2,13	2,00	2,58		3,72	3,11
Junio	-0,10	0,10	0,08	0,20		3,67	2,23	2,09	2,79		3,54	3,32
Julio	0,02	0,02	0,19	0,09		3,69	2,25	2,28	2,88		3,52	3,32
Agosto	0,02	0,00	0,09	0,14		3,71	2,25	2,37	3,02		3,46	3,30
Septiembre	0,27	0,09	0,17	0,21		3,99	2,34	2,55	3,34		3,69	3,11
Octubre	0,33	-0,03	0,15	0,27		4,33	2,31	2,79	3,52		4,13	2,75
Noviembre	0,25	0,09	0,03	0,34		4,59	2,40	2,74	3,87		4,55	2,58
Diciembre	0,18	0,09	0,10	0,48		4,77	2,49	2,84	4,18		4,77	2,49

Fuente. (DANE, 2021)

En materia general en la construcción se agrupan 3 aspectos en los que se miden los costos estos son: Materiales, Mano de Obra y Maquinaria y Equipo, y de los cuales, a continuación, se presenta la actuación correspondiente al periodo comprendido entre abril de 2020 y abril del 2021 de la siguiente manera:

Figura 23. Comportamiento de la variación anual del ICCV total y VIS según Grupos de Costos

Grupos de costos	Peso %	Variación (%)		Diferencia puntos porcentuales	Contribución (puntos porcentuales)	
		2020	2021		2020	2021
Materiales	66,05	3,48	7,07	3,59	2,22	4,50
Mano de obra	28,51	3,55	2,39	- 1,16	1,13	0,76
Maquinaria y equipo	5,44	1,70	0,96	- 0,74	0,08	0,04
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>3,42</b>	<b>5,30</b>	<b>1,88</b>	<b>3,42</b>	<b>5,30</b>

Fuente. (DANE, 2021)

Se observa que de los Grupos de costos que más inciden en el encarecimiento de la construcción se encuentran los Materiales con una variación de 3 puntos porcentuales entre abril del 2020 y abril del 2021.

Por ejemplo, tomando como referencia el concreto se evidencia que los precios han variado de manera notable desde el año 2016, en gran parte debido a los cambios presentados en la economía colombiana pasando el IVA del 16% al 19% , esto sumado a la gran cantidad de aranceles a pagar por la importación de insumos para su producción como el Clinker y los costos por transporte desde puertos a plantas productoras, hacen que su precio fluctúe y que el constructor decida bajo criterios como la oferta y la demanda [23], la calidad y el respaldo que se le ofrece, que tipo de concreto (concretera) utilizará para implementar en su proyecto, por esto se hace tan necesario mejorar de alguna manera el uso de este material desde el diseño hasta la ejecución de cada uno de los proyectos.

Los precios tomados como referencia para la elaboración de los siguientes Análisis de Precios Unitarios (A.P.U), provienen de las bases de la Gobernación de Cundinamarca [24], así como de concretas como Argos, Cemex y Polimix, estos precios corresponden al 2do semestre de 2020 y que son referencia para 2021 en materia de contratación y suministro, y que se plasman en el siguiente comparativo aplicado al proyecto base del cual es objeto el presente trabajo de grado, donde se

mostrarán los cambios en los precios de acuerdo con la optimización realizada a las columnas.

Tabla 5. Análisis de Precios Unitarios Propuesta Inicial.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS			
<b>OBRA: VIVIENDA VIS EN GUADUA-CONCRETO</b>		<b>Fecha:</b>	<b>25/05/2021</b>
ITEM:	Estructuras en concreto reforzado	Unidad:	m <sup>3</sup>
Sub-tem:	Columnas en Concreto 4500 PSI (31 MPa) Fluido		

MATERIALES					
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
	Concreto 4500 PSI (31 MPa) Fluido	0.225	m <sup>3</sup>	\$ 477,268	\$ 107,385
	Sika antisol blanco pigmentado 200 kg	0.12	kg	\$ 5,452	\$ 654
<b>Sub - Total Materiales</b>					<b>\$ 108,040</b>

EQUIPOS					
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
	Vibrador	0.125	dia	\$ 37,000.00	\$ 4,625
	Bomba estacionaria o autobomba concreto	0.225	m <sup>3</sup>	\$ 42,000.00	\$ 9,450
	Formaleta metálica por m2-mes	3.00	m <sup>2</sup>	\$ 94,818.00	\$ 284,454
	Herramienta menor %	3.72	Global	\$ 1,000.00	\$ 3,719
<b>Sub - Total Equipos</b>					<b>\$ 302,248</b>

MANO DE OBRA (incluido factor prestacional)					
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
	Cuadrilla (oficial+ 2ayudantes)	2	hr	\$ 21,544.00	\$ 43,088
<b>Sub - Total Mano de obra</b>					<b>\$ 43,088</b>

SUBCONTRATOS					
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
	AIU (7%+3%+5%)	15.00%	%MD	\$ 43,088.00	\$ 6,463
<b>Sub - Total Subcontratos</b>					<b>\$ 6,463</b>

<b>Valor total unitario:</b>	<b>\$ 459,839</b>
------------------------------	-------------------

Fuente: Los autores

Tabla 6. Análisis de Precios Unitarios Propuesta Optimizada.

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS			
<b>OBRA: VIVIENDA VIS EN GUADUA-CONCRETO</b>		<b>Fecha:</b>	<b>25/05/2021</b>
<b>ITEM:</b>	Estructuras en concreto reforzado	<b>Unidad:</b>	m <sup>3</sup>
<b>Sub-Item:</b>	Columnas en Concreto 3000 PSI (21 MPa) Fluido		

MATERIALES					
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
	Concreto 3000 PSI (21 MPa) Fluido	0.125	m <sup>3</sup>	\$ 417,475	\$ 52,184
	Sika antisol blanco pigmentado 200 kg	0.1	kg	\$ 5,452	\$ 545
<b>Sub - Total Materiales</b>					<b>\$ 52,730</b>

EQUIPOS					
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
	Vibrador	0.125	dia	\$ 37,000.00	\$ 4,625
	Bomba estacionaria o autobomba concreto	0.125	m <sup>3</sup>	\$ 42,000.00	\$ 5,250
	Formaleta metalica por m2-mes	2.5	m <sup>2</sup>	\$ 94,818.00	\$ 237,045
	Herramienta menor %	3.72	Global	\$ 1,000.00	\$ 3,719
<b>Sub - Total Equipos</b>					<b>\$ 250,639</b>

MANO DE OBRA (incluido factor prestacional)					
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
	Cuadrilla (oficial + 2 ayudantes)	2	hr	\$ 21,544.00	\$ 43,088
<b>Sub - Total Mano de obra</b>					<b>\$ 43,088</b>

SUBCONTRATOS					
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
	AIU (7%+3%+5%)	15.00%	%MD	\$ 43,088.00	\$ 6,463
<b>Sub - Total Subcontratos</b>					<b>\$ 6,463</b>

<b>Valor total unitario:</b>	<b>\$ 352,920</b>
------------------------------	-------------------

Fuente: Los autores

Los resultados de la optimización de la sección transversal de las columnas en cuanto a costos de construcción en el proyecto tomado como referencia "construcción de una Vivienda VIS" de la cual es objeto este trabajo de grado, hacen referencia a los costos directos es decir que son los recursos (Mano de Obra y

Materiales), que afectan de manera inmediata el costo de realización del proyecto y es donde se evidencia de acuerdo con los Análisis de Precios Unitarios (Figura 22 y Figura 23) un cambio significativo en el costo de construcción de las columnas de concreto interpretándolos de la siguiente manera:

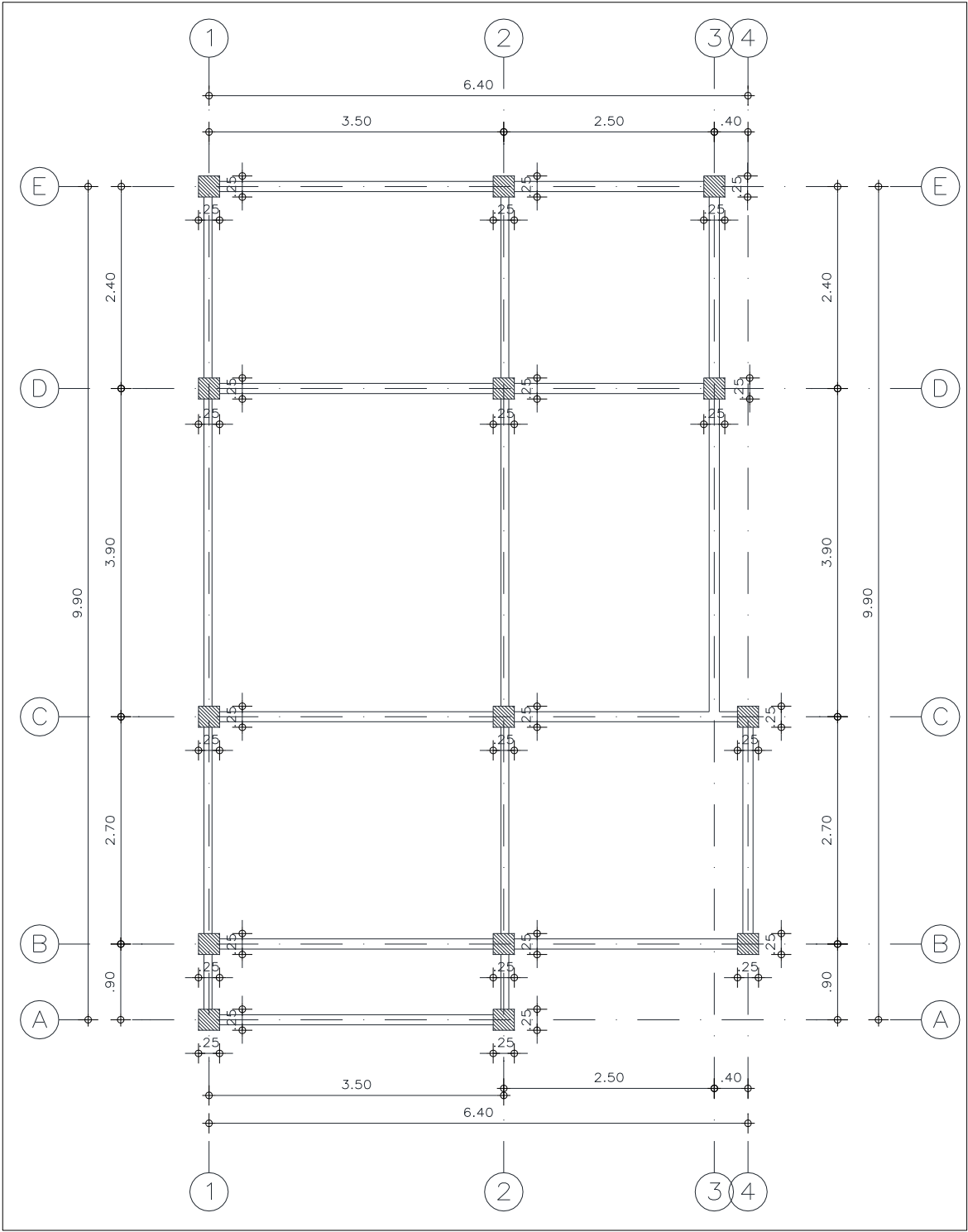
*a. El costo de Mano de Obra no varía debido a que:*

- Se debe figurar o amarrar determinado acero que puede que cambie en longitudes o cuantías, pero es la misma columna.
- El proceso constructivo no cambia por la modificación de la sección transversal
- de las columnas, ya que de igual manera deben modular las columnas con formaleta
- y ajustar prácticamente la misma cantidad de equipo.
- El proceso de fundida de la columna es el mismo en termino de personal implementado para vaciado, vibrado, desencofrado y curado de la misma.
- El tiempo de fundida puede cambia debido al volumen que se deja de fundir, pero este se puede utilizar en otras actividades también concernientes a la ejecución de las columnas.

*b. El costo de Materiales y equipo si varia debido a que:*

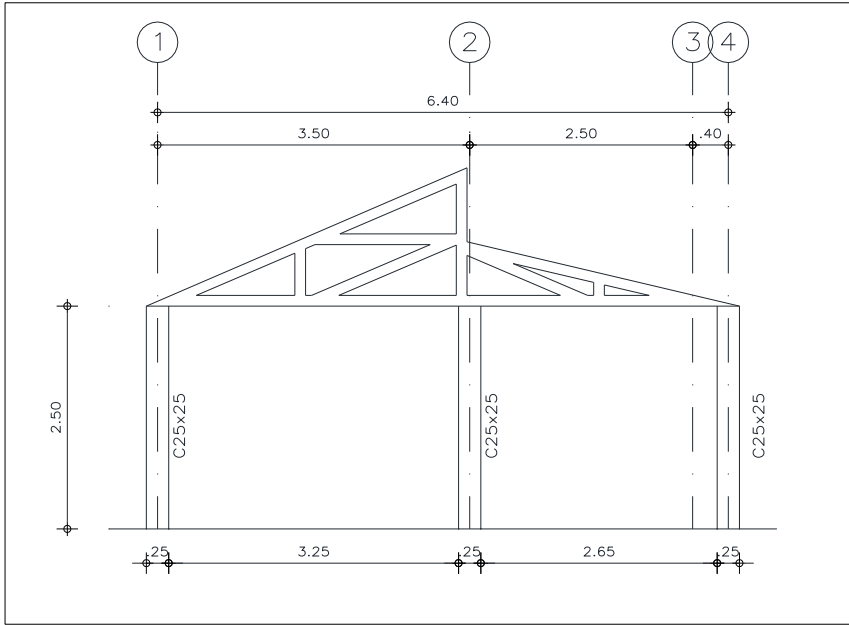
- El proceso de Optimización de la estructura del proyecto arroja como resultado una reducción de la sección de las columnas, en donde pasan de ser de dimensiones 0.30 m x 0.30 m, calculando un volumen estimado de concreto de 3,15 m<sup>3</sup>, a una sección de 0.25m x 0.25m con un volumen de concreto a utilizar de 2,19 m<sup>3</sup>.

Figura 24. Planta prototipo secciones modificadas



Fuente: Los autores

Figura 25. Corte prototipo secciones modificadas



Fuente: Los autores

En La propuesta del proyecto base de este trabajo de grado se utiliza un concreto de resistencia de 4500 psi (31 MPa) (Tabla 5); Dentro de la formulación de los parámetros ingresados al programa Matlab para la optimización de estas columnas se plantea una resistencia de 3000 psi (21 MPa) (Tabla 6), arrojando buenos resultados en cuanto a deformaciones y desplazamientos máximos, motivo por el cual al cambiar la resistencia del concreto también se ve reflejado en los costos de construcción de las columnas.

De esta manera y tomando como referencia precios base 2020 de tres concreteras reconocidas como los son ARGOS, CEMEX Y POLIMIX se obtuvo un precio promedio que nos da un dato aproximado del costo del concreto.

Tabla 7. Comparativo concreto

PROVEEDOR	TIPO DE CONCRETO	
	3000 PSI - 1/2" - Asc 6"	
CEMEX	\$	446,488
ARGOS	\$	457,103
POLIMIX	\$	348,835
PROMEDIO	\$	417,475

(a) comparativo Concreto 4500 PSI

PROVEEDOR	TIPO DE CONCRETO	
	4500 PSI - 1/2" - Asc 6"	
CEMEX	\$	493,255
ARGOS	\$	500,966
POLIMIX	\$	437,583
PROMEDIO	\$	477,268

b) comparativo concreto 3000 PSI.



A primera vista se observa la variación del costo por m<sup>3</sup> debido al cambio de resistencia de diseño pasando de \$ 477.268 (Concreto de 4500 psi) a \$ 417.475 (Concreto de 3000 psi); Ahora bien, tomando los valores de concreto obtenidos por el volumen total (m<sup>3</sup>) requerido para fundir las columnas se obtiene:

Tabla 8. Precio total del concreto

CONCRETO 4500 PSI		CONCRETO 3000 PSI	
NUMERO DE COLUMNAS	14	NUMERO DE COLUMNAS	14
ANCHO	0.3	ANCHO	0.25
LARGO	0.3	LARGO	0.25
ALTO	2.5	ALTO	2.5
TOTAL CONCRETO (m <sup>3</sup> )	3.15	TOTAL CONCRETO (m <sup>3</sup> )	2.1875
<b>PRECIO CONCRETO</b>	<b>\$1,503,394</b>	<b>PRECIO CONCRETO</b>	<b>\$ 913,228</b>

(a) Precio Total del Concreto Columnas 4500 PSI. (b) Precio total del concreto columnas 3000 PSI.

De esta manera se concluye que por medio de la Optimización de la sección de las columnas y diseñando las mismas con concreto que pasa de 4500 a 3000 psi, tenemos una reducción de \$ 590.617 equivalente al 39.26 %, en el costo del concreto.

## 11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se generó el acople del Algoritmo DEA, estableciendo de esta manera la sección mínima (0.25m x 0.25m) para las columnas del proyecto "Vivienda de Interés social VIS Guadua", cumpliendo con los parámetros estipulados en la NSR-10 en cuanto a secciones mínimas, desplazamientos, derivas y sismo-resistencia.
- La optimización de la sección mínima de las columnas y el replantear la resistencia de diseño del concreto, permitió reducir el costo de construcción de las columnas en 39.3 %, lo que hace de esta Optimización no solo eficiente en materia estructural si no más económica que la propuesta inicial.
- Debido a que el proyecto "Vivienda de Interés Social en Guadua" está siendo considerado para su ejecución por parte del semillero Sigesco de la Universidad Católica de Colombia, este tipo de reducción de costos en el concreto utilizado en las columnas son de gran relevancia, puesto que este proyecto se presenta como una solución habitacional a personas con recursos limitados del barrio Yomasa de la localidad de Usme, para quienes se va a construir.
- A través de los resultados de este trabajo de grado se puede unificar un sistema de vivienda económico integrando una estructura esbelta de bajo costo que cumple con las normas de sismo-resistencia colombianas y materiales como la guadua que se plantean en el diseño original y que se mantienen, no solo para la construcción de una vivienda si no evaluando la posibilidad de implementarlo a una gran escala con impacto en las comunidades hacia quienes se dirigen los programas de Vivienda de Interés Social.
- Cabe resaltar que, aunque la estructura optimizada está diseñada para cumplir con los requerimientos de la Norma Sismo Resistente Colombiana, se encuentra sujeta a la implementación de buenas prácticas antes, durante y después de la fundida con el fin de que la estructura se comporte de la manera que se diseña.
- Este tipo de metodologías de optimización se podría aplicar estructuras de mayor complejidad no solo para columnas si no para vigas y muros, es una herramienta que puede resultar bastante útil como se demostró en el presente trabajo.

- Se recomienda tener un manejo amplio y suficiente de la herramienta Matlab, ya que, aunque es efectiva y se obtienen buenos resultados, su codificación toma bastante tiempo de estudio y análisis.
- Se ha podido verificar que el sistema de algoritmos de evolución diferencial se puede aplicar a armaduras 3D, y gracias al programa de Matlab se puede hacer aplicación de un sistema matricial de una forma más práctica y precisa.

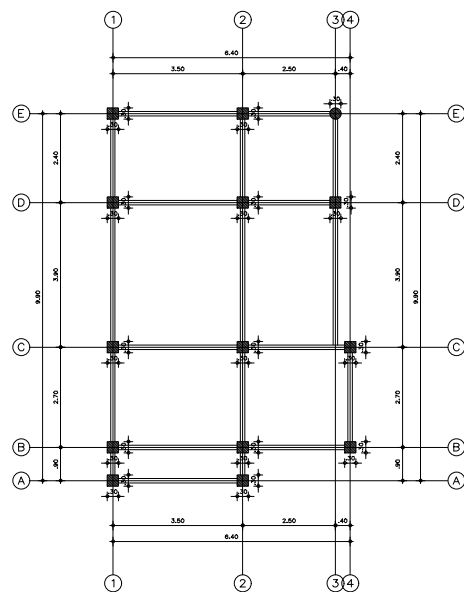
## 12. BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. S. H. Abdul Khalil a, ↑, I.U.H. Bhat a, M. Jawaid b, A. Zaidon c, D. Hermawan d, "Bamboo fibre reinforced biocomposites:," *Mater. Des.*, pp. 1–37, Jun. 2012.
- [2] R. el Tiempo, "Hannover 2000 conocerá el acero vegetal," *El tiempo*, 2000.
- [3] K. De Flander and R. Rovers, "One laminated bamboo-frame house per hectare per year," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 210–218, 2009.
- [4] K. Ghavami, "Bamboo as reinforcement in structural concrete elements," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 6, pp. 637–649, 2005.
- [5] P. van der Lugt, A. A. J. F. van den Dobbelsteen, and J. J. A. Janssen, "An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 9, pp. 648–656, Nov. 2006.
- [6] G. Forero Marín and H. Sousa Weich, "La Guadua Un Sistema Innovador Para La Construcción De Vivienda En Anapoima-Cundinamarca," *Univ. La Salle*, p. 61, 2008.
- [7] Castañeda Luis, "La guadua una alternativa para la construcción de viviendas de interés social," Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2015.
- [8] N. Vergara and A. Trujillo, "Diseño arquitectonico y estructural de una vivienda de interes social rural en guadua (*Angustifolia Kunth*)," 2019.
- [9] M. J. Reddy and D. N. Kumar, "Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms," *Water Resour. Manag.*, vol. 20, no. 6, pp. 861–878, 2006.
- [10] M. M. Antonio, "Construyen pabellon en bambu," *Reforma*, 2021.
- [11] B. A. Garro, H. Sossa, and R. A. Vázquez, "Diseño Automatico de Redes Neuronales Artificiales mediante el uso del Algoritmo de Evolucion Diferencial (ED)," *Polibits*, no. 46, pp. 13–27, 2012.

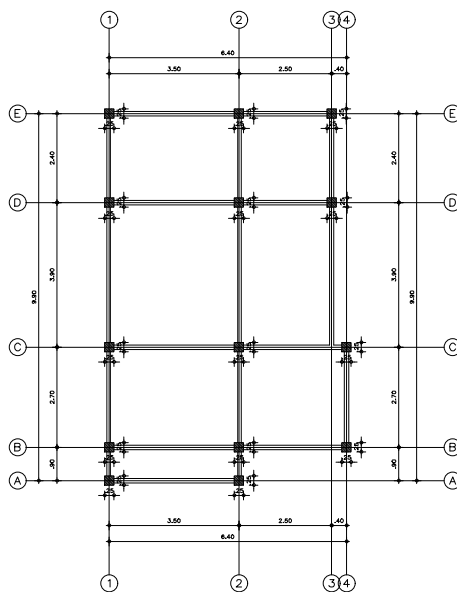
- [12] D. Yang *et al.*, "Mechanical properties of laminated bamboo under off-axis compression," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 138, no. June, 2020.
- [13] G. Chen, T. Zhou, Y. Yu, C. Tan, W. Yang, and Z. Xu, "Experimental study on mechanical performance of laminated bamboo lumber nailed connections," *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions Chinese Soc. Agric. Eng.*, vol. 36, no. 13, pp. 291–298, 2020.
- [14] C. A. Silva Giraldo, J. S. Dugarte Mendoza, and A. Mejía Jálabe, "Impacto de los costos de calidad en la ejecución de los proyectos de construcción en Colombia," *Mag. Sch. Bus. Adm.*, pp. 33–54, 2018.
- [15] S. Lozano Serna, I. Patiño Galindo, A. Gómez-Cabrera, and A. Torres, "Identificación de factores que generan diferencias de tiempo y costos en proyectos de construcción en Colombia," *Ing. y Cienc.*, vol. 14, no. 27, pp. 117–151, Jun. 2018.
- [16] R. F. Kale, "Optimización de costos de la viga en T RCC," pp. 184–187, 2014.
- [17] F. Stochino and F. L. Gayarre, "Reinforced concrete slab optimization with simulated annealing," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 15, 2019.
- [18] H. A. Yildirim, "algoritmo genético y enfoque de lógica difusa Lo último," pp. 554–567, 2019.
- [19] A. Chassiakos and G. Rempis, "Evolutionary Algorithm Performance Evaluation in Project Time - Cost Optimization," vol. 2, pp. 16–29, 2019.
- [20] C. Julián, A. William, and E. Fabián, "Evaluación de los costos de construcción de sistemas estructurales para viviendas de baja altura y de interés social," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 16, no. 4, pp. 479–490, Oct. 2015.
- [21] R. Quimbay, "Innovacion en el sector de la construcción y potencial de aplicación en Colombia," no. iii, 2010.
- [22] DANE, "Índice de Costos de la Construcción de Vivienda (ICCV)," *Información Estadista*, 2021.
- [23] J. A. Tabarez Melo, "Análisis de la variación del precio del concreto en Bogotá," 2013.
- [24] T. Carrasco and D. E. L. A. Cruz, "LISTA DE PRECIOS ICCU 2020," 2004.

### **13. ANEXOS**

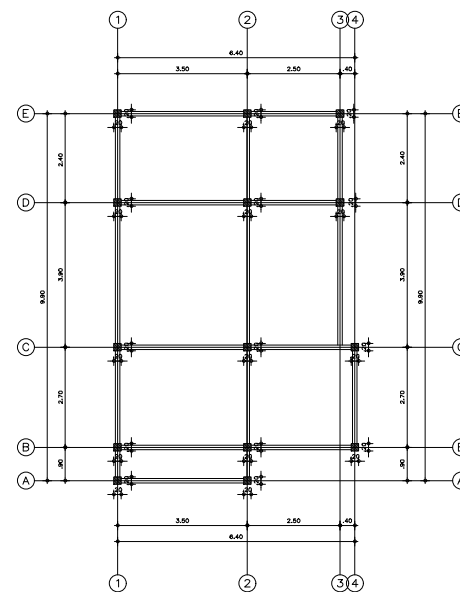
- Planos Estructurales



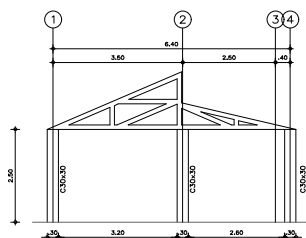
OPCIÓN ACTUAL



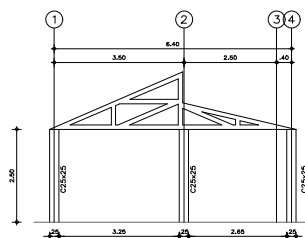
OPTIMIZACIÓN 1 (DMO)



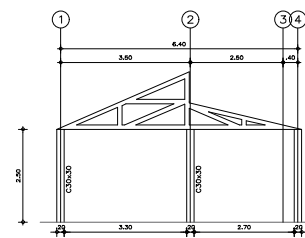
OPTIMIZACIÓN 2 (DMI)



OPCIÓN ACTUAL  
ALZADO EJE B



OPTIMIZACIÓN 1 (DMO)  
ALZADO EJE B



OPTIMIZACIÓN 2 (DMI)  
ALZADO EJE B

UNIVERSIDAD CATOLICA  
DE COLOMBIA



FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

TRABAJO DE GRADO

TESIS:

Optimización del costo de  
una vivienda VIS mediante un  
algoritmo de evolución diferencial

REALIZO :

CRISTIAN MORENO  
MIGUEL MOTTA

DOCENTE:

ING. ALBERTO PARDO OJEDA

ELABORÓ:

CRISTIAN MORENO (502804)  
MIGUEL MOTTA (502597)

OBSERVACIONES :

VISTO BUENO:

CONTIENE :

ALTERNATIVAS DE  
OPTIMIZACIÓN

DIBUJO :  
CM  
FECHA :  
MAYO DE 2021  
ESCALA :  
1:75  
ARCHIVO :  
Foto 100 10.jpg

MODIFICACIONES :

MS - ASO-TIPO DE MODIFICACION

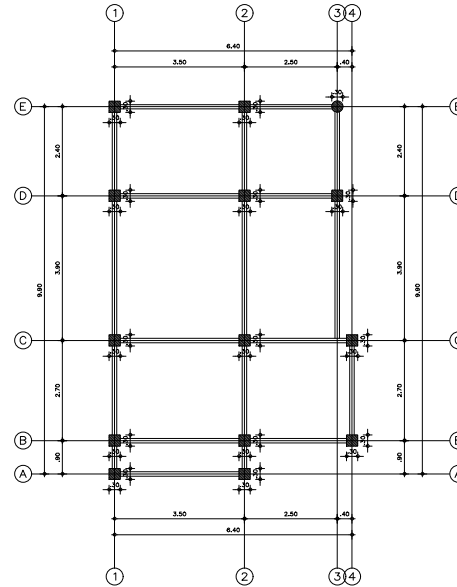
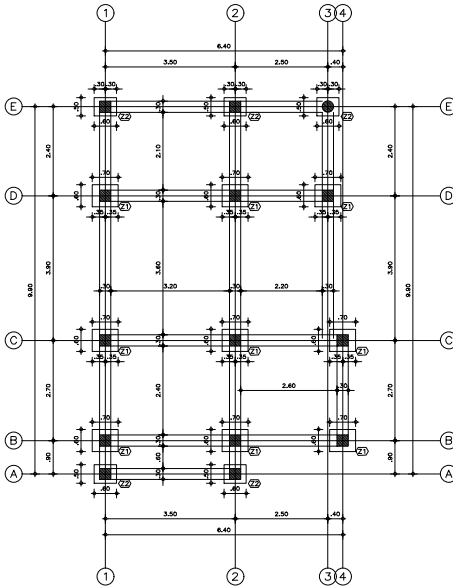
PLANO N°:

REVISIÓN N°:

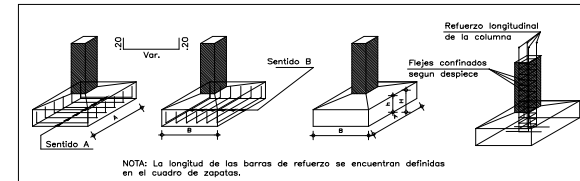
1/3

0

VERSIÓN N° :  
1



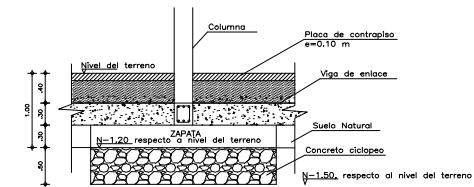
OPCIÓN ACTUAL



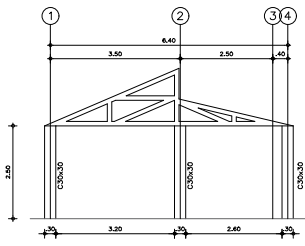
DETALLE Y DISPOSICIÓN DE REFUERZO DE LA ZAPATA – CON CHAFLÁN

CUADRO DE ZAPATAS

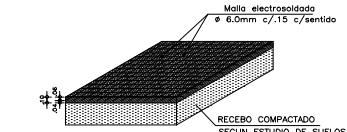
TIPO	DIMENSIONES				REFUERZO PARALELO A		CANTIDAD	CANT
	A	B	H	h	Sentido A	Sentido B		
1	0.60	0.70	.30	.30	5#4L=0.85c/.11	5#4L=0.95c/.14	1	9
2	0.50	0.60	.30	.30	4#4L=0.75c/.20	5#4L=0.85c/.11	1	5



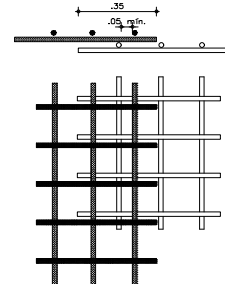
CORTE TÍPICO DE CIMENTACIÓN



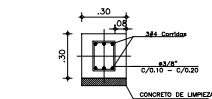
OPCIÓN ACTUAL  
ALZADO EJE B



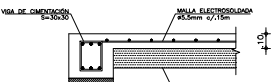
DETALLE 1. PLACA DE CONTRAPISO  
e=0.10m



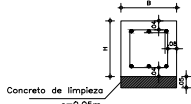
DETALLE TRASLAPO DE MALLAS  
ESC. 1:25



SECCION VIGA DE AMARRE  
DETALLE  
escala 1:20



DETALLE TÍPICO PLACA DE CONTRAPISO  
escala 1:20



RECUBRIMIENTO PARA  
VIGAS DE CIMENTACIÓN

ANTES DE FUNDIR:

- Verificar medidas, niveles con los planos arquitectónicos.
- No se permite ningún cambio de desvíos a menos que se autorice por el calculista.
- Carga viva= 180kg/m<sup>2</sup> para Vivienda
- Carga viva= 50kg/m<sup>2</sup> para Cubierta

PARAMETROS SÍSMICOS

- ESTRUCTURA CON CAPACIDAD DE DISIPACIÓN MODERADA DE ENERGÍA NSR 10
- TIPO DE SUELO= VERIFICAR EST. SUELOS
- GRUPO DE USO = I
- ZONA DE AMENAZA SÍSMICA: INTERMEDIA
- GRADO DE DESEMPEÑO DE ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES: BAJO

ESPECIFICACIONES

CONCRETO:

- f<sub>c</sub> = 3000 p.s.i. Cimentación, zapatas.
- f<sub>c</sub> = 3000 p.s.i. Entrepiso, columnas, cubierta

HIERRO:

- f<sub>y</sub> = 60000 p.s.i.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADO

TEMAS:

Optimización del costo de una vivienda VIS mediante un algoritmo de evolución diferencial

REALIZO :

CRISTIAN MORENO  
MIGUEL MOTTA

DOCENTE:

ING. ALBERTO PARDO OJEDA

ELABORÓ:

CRISTIAN MORENO (502804)  
MIGUEL MOTTA (502597)

OBSERVACIONES :

VISTO BUENO:

CONTIENE :

ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN

ESTRUCTURA INICIAL

DIBUJO : CM

FECHA : JUNIO DE 2021

ESCALA : 1/75

ARCHIVO : Foto 1000 10.jpg

MODIFICACIONES :

MES - AÑO-TIPO DE MODIFICACIÓN

PLANO Nº:

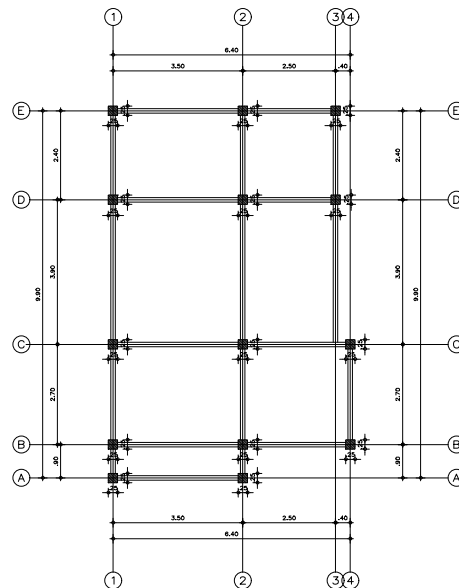
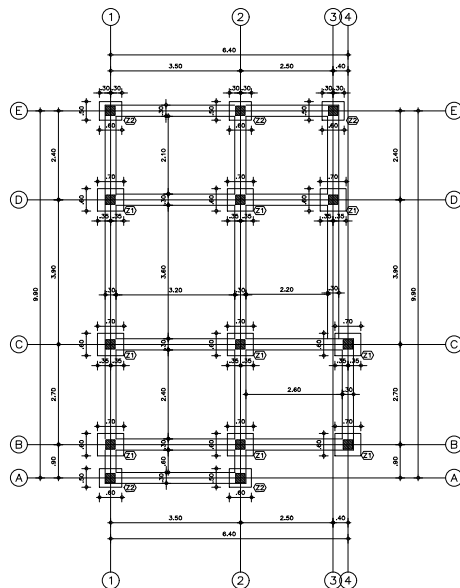
REVISIÓN Nº:

2/3

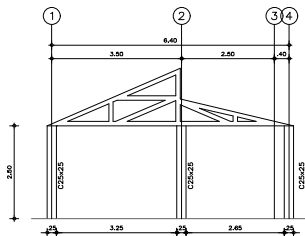
0

VERSIÓN Nº : 1

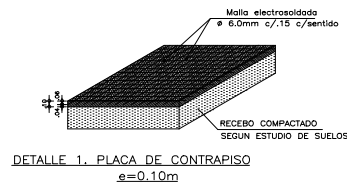




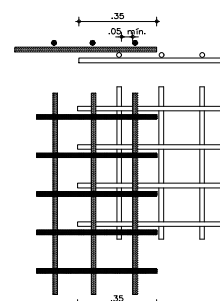
OPTIMIZACIÓN 1 (DMO)



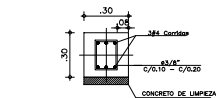
OPTIMIZACIÓN 1 (DMO)  
ALZADO EJE B



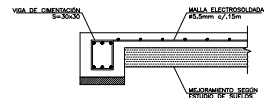
DETALLE 1. PLACA DE CONTRAPISO  
e=0.10m



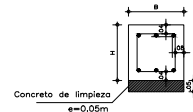
DETALLE TRASLAPLO DE MALLAS  
ESC. 1:25



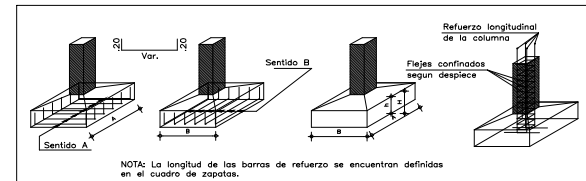
SECCION VIGA DE AMARRE  
DETALLE  
escala 1:20



DETALLE TÍPICO PLACA DE CONTRAPISO  
escala 1:20



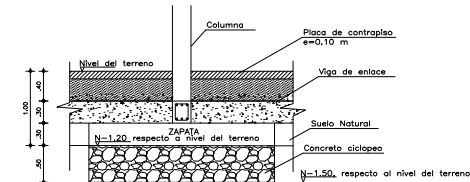
RECUBRIMIENTO PARA  
VIGAS DE CIMENTACIÓN



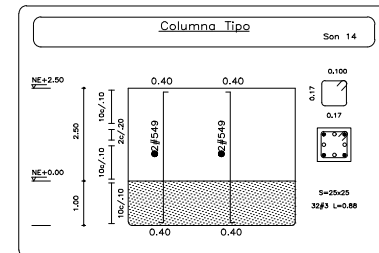
DETALLE Y DISPOSICIÓN DE REFUERZO DE LA ZAPATA – CON CHAFLÁN

CUADRO DE ZAPATAS

TIPO	DIMENSIONES			REFUERZO PARALELO A		CANTIDAD PARRILLAS	CANT
	A	B	H	Sentido A	Sentido B		
1	0.60	0.70	.30	5#4L=0.85c/.11	5#4L=0.85c/.14	1	9
2	0.50	0.60	.30	4#4L=0.75c/.20	5#4L=0.85c/.11	1	5



CORTE TÍPICO DE CIMENTACIÓN



#### ANTES DE FUNDIR:

- Verificar medidas, niveles con los planos arquitectónicos.
- No se permite ningún cambio de despieces a menos que se autorice por el calculista.

- Carga viva= 180kg/m<sup>2</sup> para Vivienda
- Carga viva= 50kg/m<sup>2</sup> para Cubierta

#### PARAMETROS SISMICOS

- ESTRUCTURA CON CAPACIDAD DE DISIPACION MODERADA DE ENERGIA NSR 10
- TIPO DE SUELO= VERIFICAR EST. SUELOS
- GRUPO DE USO = I
- ZONA DE AMENAZA SISMICA: INTERMEDIA
- GRADO DE DESEMPEÑO DE ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES: BAJO

#### ESPECIFICACIONES

- CONCRETO:
- f<sub>c</sub>= 3000 p.s.i. Cimentación, zapatas.
- f<sub>c</sub>= 3000 p.s.i. Entrepiso, columnas, cubierta
- HERRO:
- fy = 60000 p.s.i.